



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN NUEVO  
SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN PARA  
EL ROBOT BÍPEDO PASIBOT**

**Autor: Javier Pérez Caballero**

**Tutor: Higinio Rubio Alonso**

**Septiembre 2009**



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero dar las gracias a mi familia, que siempre ha estado a mi lado y me ha comprendido en los momentos más difíciles que es cuando más se necesita. Sobre todo quiero agradecerles que siempre hayan confiado en mí y me hayan mostrado todo su apoyo, además de dotarme de una total libertad de decisión para encaminar mis estudios, mostrándose siempre conformes y respetando todas mis decisiones. Por todo ello, creo que este éxito es de todos y no solo mío.

Quiero también agradecerles a mis amigos todo el apoyo mostrado durante estos años, tanto en los buenos como en los malos momentos, porque son una parte muy importante en vida y quiero compartir esto con vosotros.

Como no, se lo dedico a mis compañeros de Universidad, por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos y que espero seguir compartiendo.

Y por supuesto, quiero hacer una mención muy especial a mi tutor, D. Higinio Rubio Alonso, por todo el apoyo mostrado y la ayuda prestada a lo largo del desarrollo del proyecto, porque sin él no habría sido posible. Además he aprendido mucho de él y sobre todo he ganado un amigo.

También quiero hacer extensible este agradecimiento al resto de profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica, especialmente a Jesús Meneses y Juan Carlos García Prada, que me han ayudado en todo cuanto han podido.

Y por último, me gustaría agradecer en general, a todos los profesores que me han impartido docencia a lo largo de la carrera su dedicación y profesionalidad, porque han conseguido formarme tanto profesionalmente como personalmente.

A todos vosotros mil gracias.



## ÍNDICE

	<i>Página</i>
<b>CAPÍTULO I:</b>	
<b>MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	2
1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO	4
1.3 FASES DEL PROYECTO	7
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	8
 <b>CAPÍTULO II:</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
2.1 INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	11
2.2 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE ROBOTS	15
2.2.1 ROBOTS INDUSTRIALES	17
2.2.2 ROBOTS DE SERVICIO	21
2.3 HISTORIA DE LOS ROBOTS BÍPEDOS	25
2.3.1 ROBOTS BÍPEDOS PASIVOS	26
2.3.2 ROBOTS BÍPEDOS ACTIVOS	31
 <b>CAPÍTULO III:</b>	
<b>PROGRAMAS EMPLEADOS</b>	<b>47</b>
3.1 SOLID EDGE ST <sup>®</sup> (with Synchronous Technology)	49
3.2 MSC. ADAMS	54
3.2.1 INTRODUCCIÓN	54
3.2.2 CONTROLES BÁSICOS	55
3.2.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	57
3.2.3.1 DISEÑO DE SÓLIDOS	58
3.2.3.2 OPERACIONES BOOLEANAS	60
3.2.3.3 MODIFICACIÓN DE LOS SÓLIDOS	60
3.2.3.4 MODIFICACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES INICIALES DE LOS SÓLIDOS	61



3.2.3.5 DISEÑO DE JUNTAS, ACTUADORES Y FUERZAS	65
3.2.4 SIMULACIÓN DEL MODELO	73
3.2.5 ANIMACIÓN DEL MODELO	74
3.2.6 TOMA DE MEDIDAS	75
3.2.7 POSTPROCESADOR	76
<b>CAPÍTULO IV:</b>	
<b>MODELADO DEL PASIBOT</b>	<b>81</b>
4.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL PASIBOT	83
4.2 MODELADO DEL PASIBOT	90
4.2.1 ELEMENTOS COMUNES	91
4.2.2 ELEMENTOS DE UNIÓN Y SUJECCIÓN	103
4.2.3 ELEMENTOS MOTRICES Y SISTEMA DE TRANSMISIÓN	109
4.3 MONTAJE DEL CONJUNTO	113
4.4 SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS	120
<b>CAPÍTULO V:</b>	
<b>ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD EN ADAMS Y DISEÑO DEL NUEVO ESTABILIZADOR</b>	<b>121</b>
5.1 ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD DEL PASIBOT EN ADAMS	122
5.2 MODIFICACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PASIBOT	125
5.3 MODIFICACIÓN DEL ESTABILIZADOR DEL PASIBOT	128
5.4 DISEÑO DE LA MEJORA PROPUESTA PARA EL ESTABILIZADOR	130
5.5 COMPARACIÓN DE LAS PIEZAS MODIFICADAS	134
<b>CAPÍTULO VI:</b>	
<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	<b>138</b>
6.1 ESTUDIO DINÁMICO DEL PASIBOT ORIGINAL	142
6.1.1 DESPLAZAMIENTOS	142
6.1.2 VELOCIDADES	147
6.1.3 ACELERACIONES	152
6.2 ESTUDIO DINÁMICO DEL PASIBOT MODIFICADO	156



6.2.1 DESPLAZAMIENTOS	157
6.2.2 VELOCIDADES	162
6.2.3 ACELERACIONES	166
6.3 COMPARACIÓN DE PUNTOS DEL PASIBOT ORIGINAL	170
6.4 COMPARACIÓN DE PUNTOS DEL PASIBOT MODIFICADO	172
6.5 COMPARACIÓN DE PUNTOS ENTRE EL MODELO ORIGINAL Y MODIFICADO	175
 <b>CAPÍTULO VII:</b>	
<b>CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS</b>	<b>185</b>
7.1 CONCLUSIONES	186
7.2 FUTUROS DESARROLLOS	189
 <b>CAPÍTULO VIII:</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>190</b>
8.1 BIBLIOGRAFÍA	191
8.2 REFERENCIAS WEB	192
 <b>ANEXOS</b>	<b>195</b>
ANEXO A: PLANOS DE CONJUNTO DEL PASIBOT	196
ANEXO B: PLANO EXPLOSIONADO DEL PASIBOT	201
ANEXO C: PLANOS DE LAS PIEZAS	203
ANEXO D: PLANOS DE PIEZAS MODIFICADAS	240
ANEXO E: RELACIONES ASOCIATIVAS ENTRE PIEZAS	244
ANEXO F: GRÁFICAS EN ADAMS	267

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Robots en una cadena de montaje	3
<b>Figura 2.1:</b> Isaac Asimov	11
<b>Figura 2.2:</b> Robot soldado Sword	12
<b>Figura 2.3:</b> Telar mecánico de Jacquard	12
<b>Figura 2.4:</b> Jaquemarts	13
<b>Figura 2.5:</b> Muñecos de Jacques	13
<b>Figura 2.6:</b> Robot soldador	14
<b>Figura 2.7:</b> Nanorobot médico	14
<b>Figura 2.8:</b> Robot explorador <i>SPIRIT</i>	15
<b>Figura 2.9:</b> Robot IRb6	18
<b>Figura 2.10:</b> Configuración cartesiana	19
<b>Figura 2.11:</b> Volumen de trabajo cúbico	19
<b>Figura 2.12:</b> Configuración cilíndrica	20
<b>Figura 2.13:</b> Volumen de trabajo cilíndrico	20
<b>Figura 2.14:</b> Configuración esférica	20
<b>Figura 2.15:</b> Configuración esférica 2	21
<b>Figura 2.16:</b> Volumen de trabajo esférico	21
<b>Figura 2.17:</b> Telemanipuladores de Goertz	23
<b>Figura 2.18:</b> Handy-Man de Mosher	23
<b>Figura 2.19:</b> Telemanipulador nuclear	23
<b>Figura 2. 20:</b> Tipos de robots móviles	24
<b>Figura 2.21:</b> Wilson Walkie	26
<b>Figura 2.22:</b> Plano original de la patente " <i>Wilson Walkie</i> "	26
<b>Figura 2.23:</b> Robot bípedo pasivo de McGeer	27
<b>Figura 2.24:</b> Robot bípedo pasivo de Wisse y Ruina	28
<b>Figura 2.25:</b> Robot <i>Ranger</i>	29
<b>Figura 2.26:</b> Robot <i>Toddler</i> del MIT	30
<b>Figura 2.27:</b> Robot <i>Denise</i>	31
<b>Figura 2.28:</b> Robot <i>ELEKTRO</i>	32
<b>Figura 2.29:</b> WABOT-1	33
<b>Figura 2.30:</b> WABOT-2	34
<b>Figura 2.31:</b> E0	34
<b>Figura 2.32:</b> E1, E2, E3	35
<b>Figura 2.33:</b> Shadow Walker	36
<b>Figura 2.34:</b> E4, E5, E6	37
<b>Figura 2.35:</b> P1, P2, P3	38
<b>Figura 2.36:</b> Hadaly-2	39
<b>Figura 2.37:</b> HRP-1S	39
<b>Figura 2.38:</b> SDR-3X	40
<b>Figura 2.39:</b> ASIMO	41
<b>Figura 2.40:</b> H6	43
<b>Figura 2.41:</b> SDR-4X	43
<b>Figura 2.42:</b> HRP-2P	44
<b>Figura 2.43:</b> HRP-2	44



<b>Figura 2.44:</b> QRIO	45
<b>Figura 2.45:</b> Partner	45
<b>Figura 2.46:</b> Rh-0 y Rh-1	46
<b>Figura 3.1:</b> Menú de inicio	54
<b>Figura 3.2:</b> Espacio de trabajo y barra de tareas	55
<b>Figura 3.3:</b> Barra de tareas	57
<b>Figura 3.4:</b> Barra de tareas de diseño	58
<b>Figura 3.5:</b> Modificación de la posición	63
<b>Figura 3.6:</b> Modificación de las dimensiones	64
<b>Figura 3.7:</b> Diseño de juntas	65
<b>Figura 3.8:</b> Selección de elementos	66
<b>Figura 3.9:</b> Juntas	67
<b>Figura 3.10:</b> Menú de movimientos de precisión de juntas	67
<b>Figura 3.11:</b> Cuadro de diálogo de actuadores	69
<b>Figura 3.12:</b> Constructor de funciones	70
<b>Figura 3.13:</b> Menú de Fuerzas	71
<b>Figura 3.14:</b> Menú de Contactos	72
<b>Figura 3.15:</b> Menú de Simulación	73
<b>Figura 3.16:</b> Menú de Animación	74
<b>Figura 3.17:</b> Medidas	76
<b>Figura 3.18:</b> Paso de medidas al postprocesador	77
<b>Figura 3.19:</b> Postprocesador	77
<b>Figura 3.20:</b> Exportación de datos y archivos	78
<b>Figura 3.21:</b> Grabación de animaciones	79
<b>Figura 3.22:</b> Simplificación del fémur para Adams	79
<b>Figura 3.23:</b> Guardar un conjunto en formato " <i>Parasolid</i> "	80
<b>Figura 4.1:</b> Mecanismo de Chebyshev	84
<b>Figura 4.2:</b> Mecanismo de Pantógrafo	85
<b>Figura 4.3:</b> Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo	86
<b>Figura 4.4:</b> Chebyshev, Pantógrafo y Estabilizador	87
<b>Figura 4.5:</b> Secuencia del paso del Pasibot	88
<b>Figura 4.6:</b> Pasibot original	88
<b>Figura 4.7:</b> Nomenclatura de los componentes del Pasibot	89
<b>Figura 4.8:</b> Cadera exterior derecha y Cadera interior derecha	92
<b>Figura 4.9:</b> Manivela	93
<b>Figura 4.10:</b> Biela	93
<b>Figura 4.11:</b> Balancín	94
<b>Figura 4.12:</b> Estabilizador	95
<b>Figura 4.13:</b> Deslizadera	95
<b>Figura 4.14:</b> Corredera	96
<b>Figura 4.15:</b> Fémur	97
<b>Figura 4.16:</b> Contrafémur	97
<b>Figura 4.17:</b> Tendón superior	98
<b>Figura 4.18:</b> Tendón inferior	99
<b>Figura 4.19:</b> Rodilla	99
<b>Figura 4.20:</b> Tibia	100
<b>Figura 4.21:</b> Peroné	101
<b>Figura 4.22:</b> Pie derecho	101





<b>Figura 4.23:</b> Pie izquierdo	102
<b>Figura 4.24:</b> Pie derecho nuevo	102
<b>Figura 4.25:</b> Pie izquierdo nuevo	103
<b>Figura 4.26:</b> Arandela	103
<b>Figura 4.27:</b> Rodamiento	104
<b>Figura 4.28:</b> Separador	104
<b>Figura 4.29:</b> Ejes roscados	105
<b>Figura 4.30:</b> Ejes de Cadera	106
<b>Figura 4.31:</b> Ejes de Cadera 2	106
<b>Figura 4.32:</b> Eje principal	107
<b>Figura 4.33:</b> Tornillo M5	107
<b>Figura 4.34:</b> Tuercas M5	108
<b>Figura 4.35-1:</b> Pieza motor 1	109
<b>Figura 4.35-2:</b> Pieza motor 2	109
<b>Figura 4.35:</b> Motor	109
<b>Figura 4.36:</b> Enganche motor - Eje primario	110
<b>Figura 4.37:</b> Rueda dentada primaria	110
<b>Figura 4.38:</b> Conjunto secundario	111
<b>Figura 4.39:</b> Rueda dentada principal	111
<b>Figura 4.40:</b> Correas 1 y 2	112
<b>Figura 4.41:</b> Biblioteca de piezas	115
<b>Figura 4.42:</b> Relaciones asociativas	116
<b>Figura 4.43:</b> Pierna derecha y pierna izquierda	117
<b>Figura 4.44:</b> Caderas y sistema de transmisión	118
<b>Figura 4.45:</b> Pasibot completo	119
<b>Figura 4.46:</b> Simulación de motor	120
<b>Figura 5.1:</b> c.d.g del modelo original	123
<b>Figura 5.2:</b> Pie pivotando en el talón al inicio del paso	123
<b>Figura 5.3:</b> Pie pivotando en la punta al inicio del paso	123
<b>Figura 5.4:</b> Contrapeso	125
<b>Figura 5.5:</b> c.d.g del modelo modificado	126
<b>Figura 5.6:</b> Pie al inicio del paso	127
<b>Figura 5.7:</b> Pie al final del paso	127
<b>Figura 5.8:</b> Desplazamiento del estabilizador	128
<b>Figura 5.9:</b> Estabilizador en la posición "0"	128
<b>Figura 5.10:</b> Pie para $\frac{3}{4}$ de ciclo	129
<b>Figura 5.11:</b> Estabilizador para $\frac{3}{4}$ de ciclo	129
<b>Figura 5.12:</b> Trayectorias del estabilizador	130
<b>Figura 5.13:</b> Nuevo diseño del estabilizador.	131
<b>Figura 5.14:</b> Nueva corredera en "T"	131
<b>Figura 5.15:</b> Caderas con nuevo mecanismo	132
<b>Figura 5.16:</b> Mejora de las trayectorias de los pies y el estabilizador	133
<b>Figura 5.17:</b> Cadera original (izq) y modificada (dcha)	134
<b>Figura 5.18:</b> Estabilizador original (arriba) y modificado (abajo)	135
<b>Figura 5.19:</b> Corredera original (arriba) y modificada (abajo)	135
<b>Figura 5.20:</b> Pasibot modificado	137
<b>Figura 6.1:</b> Nomenclatura articulaciones Pasibot original	139
<b>Figura 6.2:</b> Simplificación del fémur para Adams	140



<b>Figura 6.3:</b> Pasibot simplificado para Adams	141
<b>Figura 6.4:</b> Trayectoria punto A Pasibot original	143
<b>Figura 6.5:</b> Trayectoria punto A eje X Pasibot original	143
<b>Figura 6.6:</b> Trayectoria punto A eje Y Pasibot original	144
<b>Figura 6.7:</b> Trayectoria punto E Pasibot original	144
<b>Figura 6.8:</b> Trayectoria punto E eje X Pasibot original	145
<b>Figura 6.9:</b> Trayectoria punto E eje Y Pasibot original	145
<b>Figura 6.10:</b> Trayectoria punto H Pasibot original	146
<b>Figura 6.11:</b> Trayectoria punto H eje X Pasibot original	146
<b>Figura 6.12:</b> Trayectoria punto H eje Y Pasibot original	147
<b>Figura 6.13:</b> Velocidades punto A eje X Pasibot original	148
<b>Figura 6.13-1:</b> Evolución temporal de velocidades Punto A eje X Pasibot origina	149
<b>Figura 6.14:</b> Velocidades punto A eje Y Pasibot original	150
<b>Figura 6.15:</b> Velocidades punto E eje X Pasibot original	150
<b>Figura 6.16:</b> Velocidades punto E eje Y Pasibot original	151
<b>Figura 6.17:</b> Velocidades punto H eje X Pasibot original	151
<b>Figura 6.18:</b> Velocidades punto H eje Y Pasibot original	152
<b>Figura 6.19:</b> Aceleraciones punto A eje X Pasibot original	153
<b>Figura 6.20:</b> Aceleraciones punto A eje Y Pasibot original	153
<b>Figura 6.21:</b> Aceleraciones punto E eje X Pasibot original	154
<b>Figura 6.22:</b> Aceleraciones punto E eje Y Pasibot original	154
<b>Figura 6.23:</b> Aceleraciones punto H eje X Pasibot original	155
<b>Figura 6.24:</b> Aceleraciones punto H eje Y Pasibot original	155
<b>Figura 6.25:</b> Nomenclatura articulaciones Pasibot modificado	156
<b>Figura 6.26:</b> Trayectoria punto A Pasibot modificado	157
<b>Figura 6.27:</b> Trayectoria punto A eje X Pasibot modificado	158
<b>Figura 6.28:</b> Trayectoria punto A eje Y Pasibot modificado	158
<b>Figura 6.29:</b> Trayectoria punto E Pasibot modificado	159
<b>Figura 6.30:</b> Trayectoria punto E eje X Pasibot modificado	159
<b>Figura 6.31:</b> Trayectoria punto E eje Y Pasibot modificado	160
<b>Figura 6.32:</b> Trayectoria punto H Pasibot modificado	160
<b>Figura 6.33:</b> Trayectoria punto H eje X Pasibot modificado	161
<b>Figura 6.34:</b> Trayectoria punto H eje Y Pasibot modificado	161
<b>Figura 6.35:</b> Velocidades punto A eje X Pasibot modificado	162
<b>Figura 6.36:</b> Velocidades punto A eje Y Pasibot modificado	163
<b>Figura 6.37:</b> Velocidades punto E eje X Pasibot modificado	163
<b>Figura 6.38:</b> Velocidades punto E eje Y Pasibot modificado	164
<b>Figura 6.39:</b> Velocidades punto H eje X Pasibot modificado	164
<b>Figura 6.40:</b> Velocidades punto H eje Y Pasibot modificado	165
<b>Figura 6.41:</b> Aceleraciones punto A eje X Pasibot modificado	166
<b>Figura 6.42:</b> Aceleraciones punto A eje Y Pasibot modificado	167
<b>Figura 6.43:</b> Aceleraciones punto E eje X Pasibot modificado	167
<b>Figura 6.44:</b> Aceleraciones punto E eje Y Pasibot modificado	168
<b>Figura 6.45:</b> Aceleraciones punto H eje X Pasibot modificado	168
<b>Figura 6.46:</b> Aceleraciones punto H eje Y Pasibot modificado	169
<b>Figura 6.47:</b> Comparación puntos A y B modelo original	170
<b>Figura 6.48:</b> Comparación puntos E y F modelo original	171



<b>Figura 6.49:</b> Comparación puntos H e I modelo original	171
<b>Figura 6.50:</b> Comparación puntos A y B modelo modificado	172
<b>Figura 6.51:</b> Comparación puntos E y F modelo modificado	173
<b>Figura 6.52:</b> Comparación puntos H e I modelo modificado	173
<b>Figura 6.53:</b> Comparación del punto A entre ambos modelos	175
<b>Figura 6.54:</b> Comparación del punto A eje X entre ambos modelos	176
<b>Figura 6.55:</b> Comparación del punto A eje Y entre ambos modelos	176
<b>Figura 6.56:</b> Comparación del punto B entre ambos modelos	177
<b>Figura 6.57:</b> Comparación del punto E entre ambos modelos	177
<b>Figura 6.58:</b> Comparación del punto E eje X entre ambos modelos	178
<b>Figura 6.59:</b> Comparación del punto E eje Y entre ambos modelos	178
<b>Figura 6.60:</b> Comparación del punto F entre ambos modelos	179
<b>Figura 6.61:</b> Comparación del punto H entre ambos modelos	179
<b>Figura 6.62:</b> Comparación del punto H eje X entre ambos modelos	180
<b>Figura 6.63:</b> Comparación del punto H eje Y entre ambos modelos	180
<b>Figura 6.64:</b> Comparación del punto I entre ambos modelos	181
<b>Figura 6.65:</b> Sistema de coordenadas	184
<b>Figura 7.1:</b> Puntos de estudio A, E y H en ambos modelos	187

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1:</b> Diferentes versiones de <i>Solid Edge</i>	51
<b>Tabla 4.1:</b> Propiedades del <i>AI 2024-T351</i>	83



# Capítulo I:

## *MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO*

## 1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Las tendencias tecnológicas actuales y futuras muestran un claro enfoque hacia la utilización de todo tipo de robots y dispositivos electrónicos en nuestra vida cotidiana que ayuden al ser humano a desarrollar de una forma más eficaz y con mayores garantías sus actividades. En este sentido, la robótica de servicio es una de las áreas de mayor auge entre las líneas de investigación en campos como la robótica y la automatización. En la actualidad, existen líneas de diseño de robots orientadas a diversas áreas muy diferentes, como pueden ser: asistencia personal, aplicaciones médicas, cadenas de montaje (Figura 1.1) y otras muchas disciplinas.

Otra línea muy importante, de gran desarrollo durante las últimas décadas, ha sido la orientada al diseño de robots humanoides, que imiten las conductas humanas. Se pretende que estos robots puedan adaptarse a un entorno doméstico o laboral en situaciones en las que las habilidades humanas se encuentran limitadas, ya sean situaciones de riesgo o de gran precisión exigida, en contraste con las de gran potencia, precisión y fiabilidad que pueden mostrar algunos humanoides.

En esta línea el grupo de investigación *MAQLAB* del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid está trabajando en un proyecto de investigación en el campo de la robótica humanoide, más concretamente se ha desarrollado un robot bípedo de tamaño natural que imita el comportamiento humano al caminar. Además, del grupo *MAQLAB*, otras muchas instituciones de todo el mundo están desarrollando este tipo de robots. Sin embargo, una de las particularidades del robot *PASIBOT* que se está desarrollando es su novedoso diseño, ya que se trata de un robot más ligero que el resto, con menos actuadores y un solo grado de libertad proporcionado por el único motor que acciona todas las articulaciones. Esta configuración le permite tener un menor peso y, por lo tanto, un menor consumo de energía.

Todo ello repercute en un diseño de menor coste económico, parámetro fundamental en cualquier tipo de proyecto que le proporciona una gran ventaja respecto al resto de sus homólogos.

Además de todo lo expuesto, se trata de un campo presente, en la actualidad, en todas las áreas de las industrias proporcionando salidas profesionales para numerosos ingenieros. Este es un aliciente atractivo como para realizar un Proyecto fin de carrera sobre esta área.

Por lo tanto, la robótica es una de las líneas de investigación que se debe potenciar hoy en día, ya que es una de las más importantes y con más futuro de seguir creciendo y expandiéndose.



**Figura 1.1:** Robots en una cadena de montaje





## 1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

El desarrollo del robot bípedo “PASIBOT” es un proyecto ambicioso en el campo de los robots de servicio: En contraposición con la gran mayoría robots humanoides actuales que presentan un gran número de grados de libertad, lo que repercute en elevado peso debido a los diferentes actuadores necesarios para producir el movimiento, con este robot se plantea una nueva concepción y un nuevo enfoque. Para ello se ha desarrollado un primer modelo de un solo grado de libertad, a través del cual se consigue una configuración muy ligera que reproduce el caminar humano de una forma muy fiable.

El objetivo que se persigue con la realización de este proyecto es el de analizar y optimizar el diseño del robot PASIBOT realizado por el Grupo MAQLAB (Laboratorio de Máquinas) con anterioridad, con el fin de detectar y corregir sus disfunciones y conseguir un funcionamiento del mismo más estable y funcional.

El *objetivo principal* del presente Proyecto Fin de Carrera, es el diseño y análisis cinemático de un nuevo sistema de transmisión para el estabilizador que forma parte del robot bípedo PASIBOT, con el fin de evitar la inclinación del mismo en el modelo original estudiado.

Para llevar a cabo este objetivo principal, se necesita realizar una serie de operaciones que la lleven a feliz término. En primer lugar se realizará un modelado, lo más fiel posible, de todo el sistema de transmisión y transformación del movimiento. Para este modelado se utilizará el programa *SOLID EDGE ST*®. En este mismo programa se simulará el movimiento del robot a través de la aplicación del *Entorno Motion*, para comprobar que todas las articulaciones realizan su movimiento de forma correcta. Una vez modeladas todas las piezas, también se realizarán los planos de cada una de ellas y del conjunto completo montado.



Para el análisis cinemático y dinámico del sistema de transmisión se utilizará el programa *MSC. ADAMS*® 2005, en el cual se simulará el funcionamiento del PASIBOT con el nuevo estabilizador y, posteriormente, aprovechando el post-procesador del programa *MSC.ADAMS* 2005, se analizará el comportamiento cinemático del mismo, para varias velocidades de rotación del motor.

Para alcanzar este objetivo principal, se deberán de ir superando secuencialmente los siguientes pasos:

- Análisis geométrico, cinemático y dinámico del modelo original del PASIBOT, con los programas Solid Edge, Working Model y ADAMS.
- Análisis geométrico y cinemático de un modelo analítico del PASIBOT original, con el programa MATLAB
- Modelado de todas las piezas del PASIBOT con el programa *SOLID EDGE ST* (incluido el sistema de transmisión por correas).
- Realización de todos los planos de cada una de las piezas, del conjunto entero y explosionado del mismo.
- Simulación de movimientos en el entorno *SOLID EDGE ST*® y simulación de su comportamiento cinemático y dinámico con el programa *ADAMS*® para comprobar el correcto funcionamiento del mismo.
- Procesamiento y análisis de los resultados obtenidos y propuesta de posibles modificaciones.





- Diseño de un nuevo sistema de estabilización para el modelo original.
  
- Implementación del nuevo modelo en el programa *ADAMS*, simulación del bípedo con el nuevo estabilizador y análisis de los resultados.
  
- Finalmente, se compararán los resultados entre el modelo original y el modelo modificado.

## 1.3 FASES DEL PROYECTO

En cualquier proyecto de ingeniería hay que definir una serie de fases de desarrollo del mismo. En nuestro caso, al tratarse de un proyecto de innovación, se dispone de mayor libertad a la hora de diseñar ya que no se tienen ninguna restricción previa y queda a criterio de los investigadores la bondad del diseño final.

Las fases planificadas para el desarrollo de este proyecto son:

- FASE 1. Estudios previos: En esta fase se plantean los objetivos, motivaciones y necesidades que el diseño debe cumplir. Se realiza un diseño conceptual y sobre él se hacen los estudios de viabilidad de forma analítica.
- FASE 2. Diseño y simulación: En esta fase se realiza el modelado del mecanismo diseñado anteriormente. Una vez implementado se procederá a la simulación y obtención de datos. Posteriormente estos datos serán analizados, pudiendo provocar modificaciones en el modelo primario si los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios.
- FASE 3. Implementación final: Cuando los resultados del modelo virtual modificado son satisfactorios y acorde con los objetivos establecidos se procederá a implementar el modelo real y se someterá a las pruebas oportunas que determinen que se han alcanzado los objetivos previamente establecidos.

El presente proyecto se puede enmarcar dentro de la fase 3, en la cual a partir del prototipo ya diseñado y construido, vamos a realizar los ensayos que determinen la viabilidad del mismo y permitan corregir las posibles disfunciones que afectan al prototipo.



## 1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento se encuentra dividido en siete capítulos, además de los anexos y la bibliografía:

### Capítulo I. Motivación y objetivos del proyecto.

En este primer capítulo se exponen las motivaciones, objetivos, fases y estructura del proyecto.

### Capítulo II. Introducción.

Se expone una breve introducción a la robótica. También se incluye una clasificación de los distintos tipos de robots bípedos activos y pasivos más destacados.

### Capítulo III. Programas empleados.

En este capítulo se hace una presentación de los dos programas principales empleados para el desarrollo del proyecto: *Solid Edge ST*<sup>®</sup> y *MSC. Adams*<sup>®</sup>.

### Capítulo IV. Modelado del Pasibot.

En este capítulo es uno de los más amplios del Proyecto. En él se explican algunas de las claves del diseño del Pasibot por el departamento MAQLAB. Posteriormente se explica todo el trabajo de modelado de cada una de las piezas, el montaje final del conjunto y la simulación de movimientos, todo ello con el programa *Solid Edge ST*<sup>®</sup>.

### Capítulo V. Estudio de funcionalidad en Adams.

En este capítulo se trata el *principal objetivo* del Proyecto, que es el estudio del modelo original en Adams y propuesta de una modificación para optimizarlo. Esta mejora es un nuevo sistema de transmisión para el estabilizador y la modificación del centro de gravedad del robot.



#### Capítulo VI. Análisis y resultados.

En este capítulo, se obtienen los resultados gráficos con el programa *Adams*® para ambos modelos: original y modificado, y se establece una comparación entre ellos.

#### Capítulo VII. Conclusiones y futuros desarrollos.

En este capítulo se obtienen las conclusiones que se han alcanzado con el desarrollo del Proyecto y se exponen trabajos futuros relacionados con la optimización del prototipo.

#### Capítulo VIII. Bibliografía.

En este último capítulo se recogen las referencias bibliográficas empleadas.

Finalmente se encuentran los *Anexos* del Proyecto:

- **Anexos A, B, C y D:** Planos de los elementos del robot
- **Anexo E:** Relaciones asociativas entre piezas
- **Anexo F:** Gráficas obtenidas con el programa *MSC. Adams*.



## Capítulo II:

### *INTRODUCCIÓN*

## 2.1 INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

### Robot

La palabra robot tiene su origen en la palabra eslava “*robota*” referida al trabajo realizado de manera forzada. Esta palabra fue utilizada por primera vez en 1921 en la obra teatral “Rossum’s Universal Robot” escrita por Karen Capek. Posteriormente aparecería en el argumento del filme alemán *Metrópolis* de Thea von Harbou y Fritz Lang en 1926 [2], [3].

Si buscamos su significado según la Real Academia Española de la Lengua, vemos que robot es: “Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas solo a las personas” [4].

En la década de los años cuarenta el bielorruso nacionalizado estadounidense Isaac Asimov, fue el pionero en utilizar la palabra robot aplicada al campo científico de construcción y programación de los mismos. Aunque sin lugar a dudas este científico es famoso por enunciar sus leyes de la robótica. En el año 1942 en su obra “*Rundaround*” establece las tres leyes de la robótica [2], [5]:

1. *Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.*
2. *Un robot a de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.*
3. *Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o la segunda ley.*



**Figura 2.1:** Isaac Asimov

## **Inteligencia artificial**

Hoy en día los avances en los campos de la electrónica y la informática han propiciado que estas leyes de Asimov se empiecen a cuestionar, ya que la inteligencia artificial está empezando a introducirse en el campo de la robótica. Con esta nueva área todavía por explotar, los robots serán capaces de tomar sus propias decisiones sin la intromisión de las órdenes humanas. Estos conceptos aplicados a la inteligencia militar dan como resultado numerosos proyectos de “robots asesinos”. El Departamento de Defensa de Estados Unidos está financiando varios estudios sobre robots armados autónomos o autogobernados que pueden encontrar y destruir objetivos según su voluntad.

Se trata de máquinas de matar muy precisas que eliminan ciertas barreras morales y van en contra de las leyes de Asimov [7], [8].

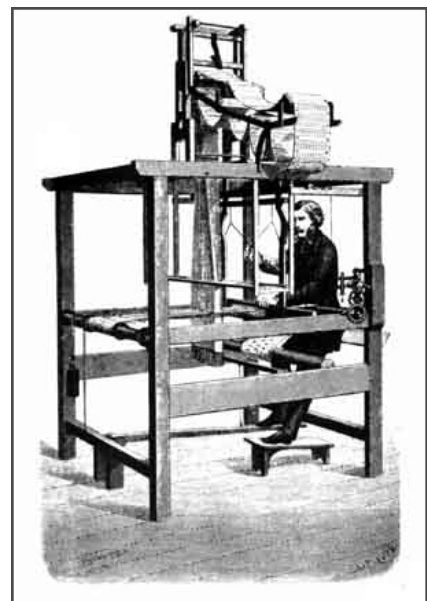


**Figura 2.2:** Robot soldado Sword

## **Antecedentes**

Desde hace siglos el ser humano ha intentado recrear de forma artificial las conductas humanas. Ya en el antiguo Egipto y Grecia se tiene constancia de artilugios muy simples pero que ya introducían el concepto de mecanismo móvil que se utilizaban para fascinar a los fieles del reino [6].

Pero el primer antecedente serio de lo que se considera un mecanismo autómatas y precedente del desarrollo de la robótica se tiene con el *telar mecánico* de Joseph Marie Jacquard.



**Figura 2.3:** Telar mecánico de Jacquard



Este primer invento se vio apoyado por la Revolución Industrial de finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, en el cual los aparatos mecánicos sufrieron un gran impulso. En esta época cabe destacar el torno mecánico de Babbitt (1892) y sobretodo unos muñecos mecánicos muy ingeniosos de dos o más posiciones que golpeaban campanas accionados por medio de mecanismos de relojería “*Jaquemarts*” que actualmente siguen funcionando y también muñecos a tamaño real contruidos por Jacques de Vaucansos imitando acciones humanas, entre las que destacan la música y la escritura.



**Figura 2.4:** Jaquemarts



**Figura 2.5:** Muñecos de Jacques

### **Robótica actual y futura**

La dimensión que han alcanzado hoy en día los robots es muy importante. En la industria existen robots muy distintos de todo tipo, dependiendo de las funciones que estén programados para realizar. Actualmente no existe ningún sector industrial que opere sin la ayuda de algún tipo de dispositivo mecánico. Las tareas que desempeñan son muy variadas, si bien todas ellas se enmarcan dentro de alguna de las siguientes funciones: tareas peligrosas, difíciles, de gran precisión, repetitivas, de gran esfuerzo requerido, etc. [6].



En otras aplicaciones, los robots son utilizados en aquellos lugares donde el ser humano no puede llegar, bien sea por sus limitaciones físicas o por otros motivos. Se trata de tareas como: exploración espacial de otros planetas, manipulación y limpieza de productos tóxicos, localización de personas, manipulación de productos radiactivos, etc.

Pero sin duda una de las aplicaciones más claras y comúnmente conocida por todos es la de cadenas de montaje. En este campo los robots son la fuente predominante y el principal activo. Los más utilizados en este caso son los robots articulados que imitan el movimiento del brazo humano. La industria que ha apostado claramente por este tipo de producción en serie, es la industria automovilística. En ella numerosos son los robots utilizados que realizan todo tipo de operaciones, tanto pintado, como soldado, atornillado, lijado, etc.



**Figura 2.6:** Robot Soldador

Otro de los campos de aplicación actualmente en gran desarrollo es el de la medicina. Cada vez se está introduciendo más el uso de aparatos mecánicos y electrónicos para mejorar sobretodo la precisión en las acciones realizadas en situaciones en las que se requiere gran precisión y exactitud. Además de todo esto se están diseñando robots microscópicos que puedan ser introducidos en el cuerpo humano a modo de exploradores que puedan viajar libremente por cualquier parte del cuerpo. Esto supone toda una revolución en el tratamiento de algunos tipos de enfermedades, ya que no es necesario más que una pequeña incisión para introducir el *nanorobot* [9].



**Figura 2.7:** Nanorobot médico

Finalmente otro sector muy importante donde los robots tienen y tendrán un protagonismo fundamental es en las exploraciones espaciales a otros planetas. Debido a las duras condiciones de los viajes espaciales y las estrictas condiciones ambientales de los planetas, los robots se presentan como la única alternativa viable hoy en día para realizar este tipo de misiones. Así se puede poner como ejemplo el robot explorador que la NASA y la Agencia Espacial Europea enviaron al planeta Marte el “*Spirit*”. Actualmente se están mejorando el diseño de este tipo de robots basados en las experiencias pasadas para tratar de hacerlos más eficaces y útiles.



**Figura 2.8:** Robot explorador *SPIRIT*

## 2.2 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE ROBOTS

Los robots se pueden clasificar en base a numerosos criterios. Dos de los criterios más utilizados son [2]:

- Clasificación por generaciones

**1ª Generación:** Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.

**2ª Generación:** Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.

**3ª Generación:** Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas.

- Clasificación por prestaciones

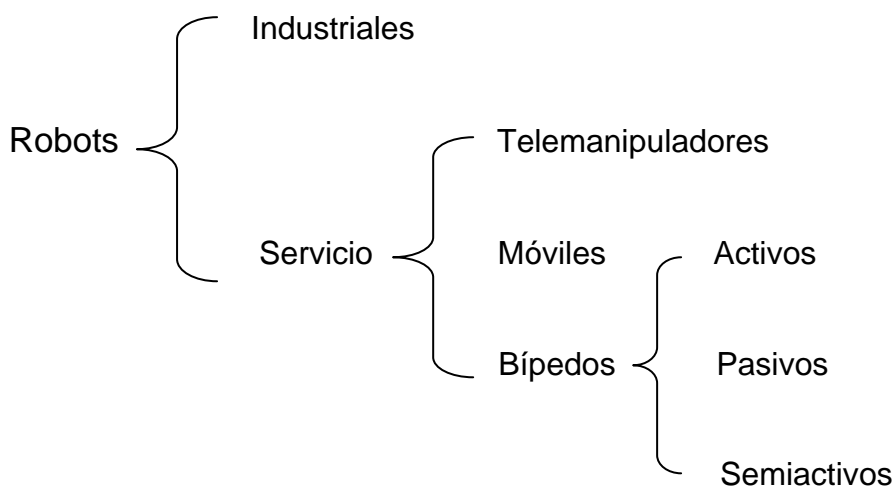
**Tipo A:** Manipulador con control manual o telemando.

**Tipo B:** Manipulador automático con ciclos preajustados, regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.

**Tipo C:** Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.

**Tipo D:** Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

Aunque la clasificación más relevante para el presente proyecto es la siguiente:



Los dos grandes grupos de robots que se utilizan hoy en día se pueden clasificar en: Robots Industriales y Robots de Servicio.



## 2.2.1 Robots Industriales

Los robots industriales son los utilizados en todo tipo de industrias: automóvil, embalaje, siderurgia, y cualquier fábrica que emplee cadenas de montaje en general. Estos robots suelen ser brazos mecánicos que desempeñan tareas repetitivas en la mayoría de los casos, que podrían llegar a ser monótonas y por lo tanto peligrosas para el hombre. Además también pueden desempeñar otro tipo de tareas como: tareas peligrosas, tareas que requieran grandes esfuerzos, nocivas para la salud, etc. [2], [10], [11], [12].

La definición de robot industrial puede ser un concepto complejo, por ello existen varias definiciones. Las más acertadas pueden ser las siguientes:

Según la *Asociación de Industrias Robóticas (RIA)*, 1974 USA, un robot industrial es: “un manipulador funcional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas”.

Según la *Federación Internacional de Robótica (IFR)* (ISO/TR 83737), 1980, un robot industrial es: “una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar piezas, materias, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento”.

Según la *Asociación Japonesa de Robótica Industrial (JIRA)*, Japón 1972, un robot industrial es: “un dispositivo capaz de moverse de modo flexible análogo al que poseen los organismos vivos, con o sin funciones intelectuales, permitiendo operaciones en respuesta a las órdenes humanas”.

El primer robot industrial “*Unimat*” es lanzado al mercado en el año 1963 por la empresa estadounidense *Unimation*. Se trata de un robot sencillo que es instalado una de las fábricas de General Motors, para realizar trabajos sucios, pesados y peligrosos.

En Europa la firma sueca ASEA (Alabama State Employees Association), actualmente conocida como ABB (ASEA Brown Boveri) lanza al mercado en el año 1972 el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico, el IRb6.



**Figura 2.9:** Robot IRb6

En 1982 el Dr. Makino de la Universidad de Yamanashi desarrolla el concepto de robot *SCARA* (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*). Se trata de robots equipados de libertad total de movimientos en los ejes X e Y, pero limitados severamente en sus desplazamientos en el eje Z. Se comportan de forma parecida al brazo humano permitiendo ubicar el extremo de la mano en cualquier ubicación pero siempre sobre el plano. Debido a sus características se usan en la fabricación de electrónica de consumo y en la clasificación de artículos para su empaquetado.

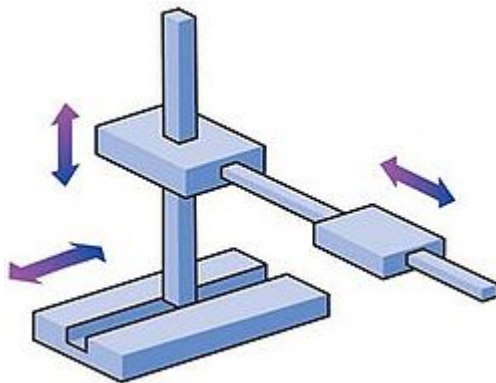
Entre las características que identifican a este tipo de robots se encuentran: su volumen de trabajo y su configuración.

El **volumen de trabajo** se refiere al espacio dentro del cual el robot puede desplazarse, el cual queda delimitado por el extremo de su muñeca.

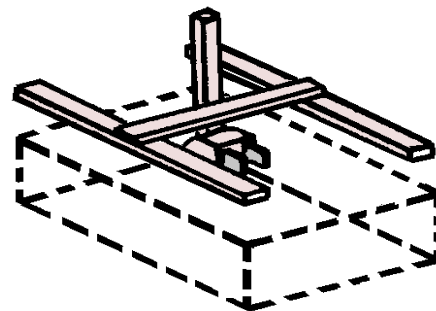
La **configuración** se refiere a la forma física que se le ha dado al brazo del robot. En este aspecto encontramos cuatro configuraciones posibles:

### 1. Configuración cartesiana:

Se trata de robots cuyos brazos poseen tres articulaciones prismáticas, cuyos ejes son perpendiculares entre sí (ejes cartesianos X, Y, Z). Los movimientos que realiza están basados en interpolaciones lineales, generando una figura de volumen cúbica de trabajo.



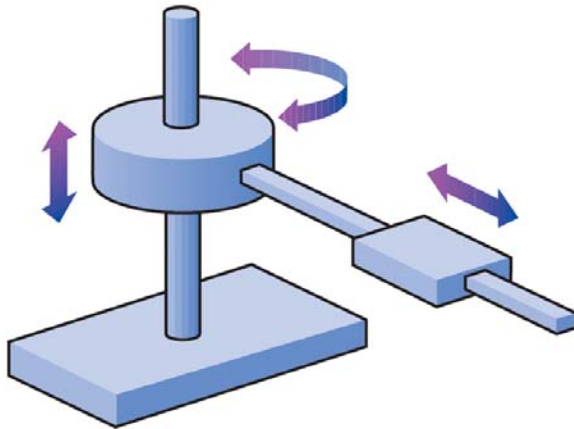
**Figura 2.10:** Configuración cartesiana



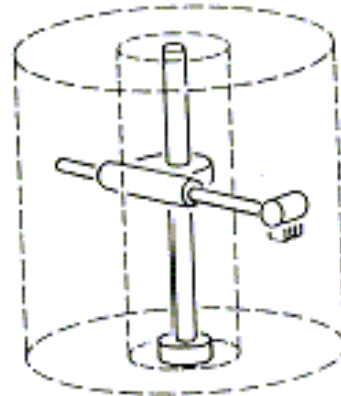
**Figura 2.11:** Volumen de trabajo cúbico

### 2. Configuración cilíndrica:

Se trata de robots cuyos ejes forman un sistema de coordenadas cilíndricas. Sus articulaciones pueden realizar tanto movimientos lineales como rotacionales. Utiliza la interpolación por articulación para moverse en un movimiento rotacional, y la interpolación lineal para mover sus dos articulaciones linealmente. Este robot presenta un volumen de trabajo en forma cilíndrica.



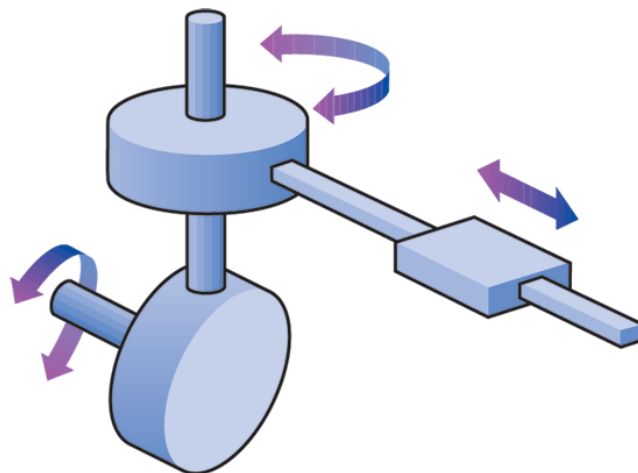
**Figura 2.12:** Configuración cilíndrica



**Figura 2.13:** Volumen de trabajo cilíndrico

### 3. Configuración esférica:

Se trata de robots cuyos ejes forman un sistema de coordenadas polares. Sus articulaciones pueden realizar tanto movimientos lineales como rotacionales. Utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos articulaciones rotacionales, y la interpolación lineal para mover su articulación linealmente.

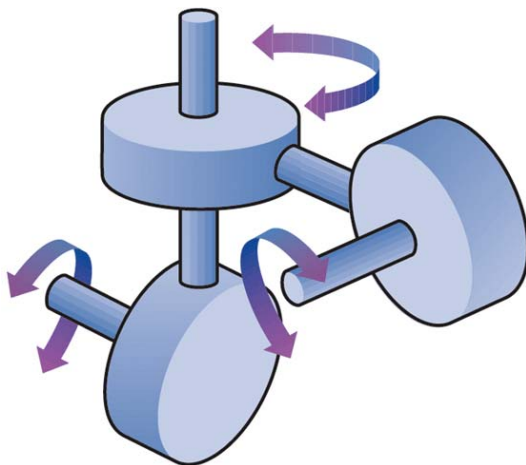


**Figura 2.14:** Configuración esférica

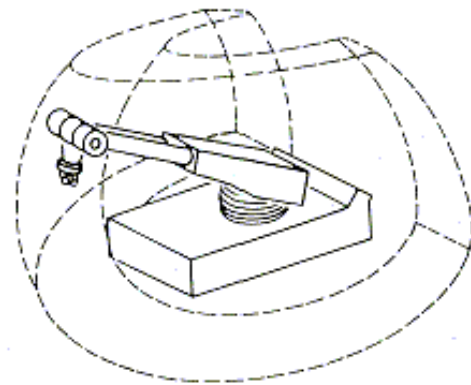


#### 4. Configuración angular ó articulada:

Se trata de robots cuyos ejes forman un sistema de coordenadas polares. Sus tres articulaciones son giratorias y realizan movimientos similares a los de un robot con estructura esférica mediante la combinación de tres giros. Presenta un volumen de trabajo en forma esférica.



**Figura 2.15:** Configuración esférica 2



**Figura 2.16:** Volumen de trabajo esférico

#### 2.2.2 Robots de servicio

Como ocurre con el propio término de la palabra robot, no es fácil encontrar una definición que delimite correctamente lo qué es un robot de servicio. La *Federación Internacional de la Robótica (IFR)* define a un robot de servicio como: *“aquel que trabaja de manera parcial o totalmente autónoma desarrollando servicios útiles para el bienestar de los humano y equipos. Pueden ser móviles y con capacidad de manipulación”* [12].

Esta definición es una adaptación de la dada anteriormente por el *IPA (Fraunhofer Institute for Produktionstechnik und Automatisierung)*, que establece que un robot de servicio es: *“un dispositivo móvil programable, que desarrolla servicios de manera total o parcialmente automática; entendiendo por servicios a aquellas tareas que no sirven directamente a la industria de*





*fabricación de bienes, sino a la realización de servicios a las personas o a los equipos”.*

En la práctica, las actuales y potenciales aplicaciones no industriales de los robots son tan variadas y diferentes, que es difícil encontrar una definición suficientemente amplia y concreta. Tratando no obstante de establecer una primera división en estas aplicaciones no industriales de los robots, la IFR ha propuesto clasificarlas en:

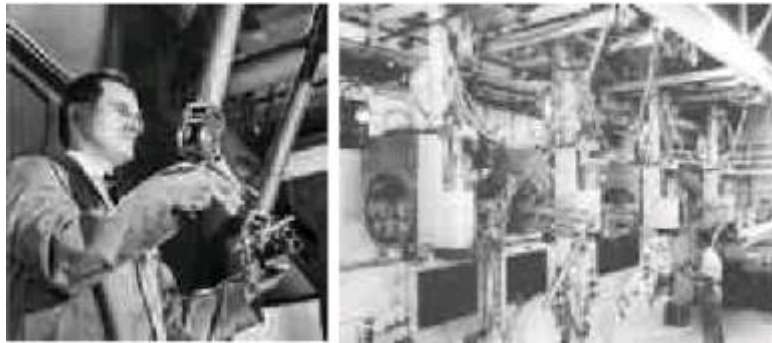
- Aplicaciones de servicios a humanos: (personal, protección, entretenimiento,...).
- Aplicaciones de servicios a equipos: (mantenimiento, reparación, limpieza,...).
- Otras funciones autónomas: (vigilancia, transporte, adquisición de datos, inspección, etc.).

Los robots de servicio se pueden clasificar en tres grandes grupos como se indicó anteriormente. Estos grupos son:

## **1. Telemanipuladores [2], [13].**

Son dispositivos robóticos con brazos manipuladores, sensores y cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador.

En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory, desarrolló, con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer telemanipulador. Éste consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo.



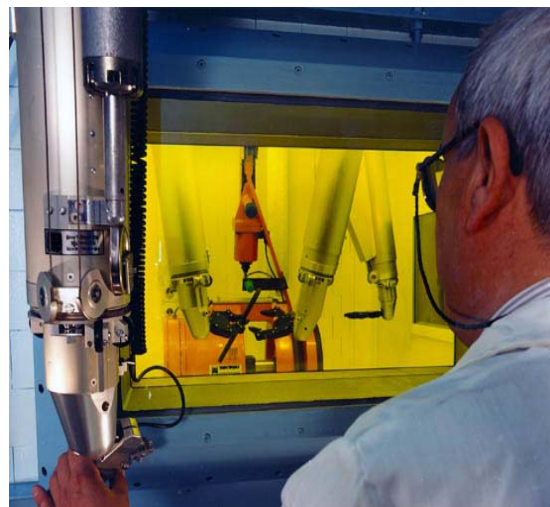
**Figura 2.17:** Telemanipuladores de Goertz

Otro de los pioneros en el campo de la telemanipulación fue Ralph Mosher, ingeniero que trabajó en la empresa General Electric. En el año 1958 Mosher desarrolló un dispositivo denominado *Handy-Man*, consistente en dos brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto. Este nuevo tipo de robots revolucionó el mundo de la robótica tal y como se conocía hasta entonces. Junto a la industria nuclear, a lo largo de los años sesenta la industria submarina comenzó a interesarse por el uso de los telemanipuladores. A este interés se sumó la industria espacial en los años setenta.



**Figura 2.18:** Handy-Man de Mosher

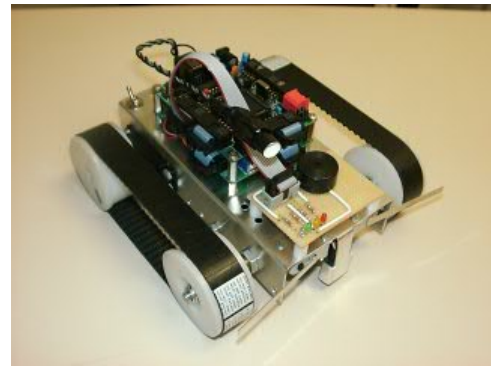
La evolución de los telemanipuladores a lo largo de los últimos años no ha sido tan espectacular como la de los robots. Recluidos en un mercado selecto y limitado (industria nuclear, militar, espacial, etc.) son en general desconocidos y comparativamente poco atendidos por los investigadores y usuarios de robots.



**Figura 2.19:** Telemanipulador nuclear

## 2. Móviles [14].

Son robots con gran capacidad de desplazamiento dotados de un sistema locomotor tipo rodante. Pueden seguir una trayectoria marcada por el teleoperador o pueden guiarse a través de la información que perciben a través de sus sensores adaptándose al entorno que le rodea. Existe una gran variedad de modos de moverse sobre una superficie sólida, entre las que destacan: las ruedas, las cadenas y las patas.



**Figura 2. 20:** Tipos de robots móviles

## 3. Bípedos [15].

Son un tipo peculiar de robots móviles. Para su desplazamiento utilizan dos piernas. Se pueden clasificar en:



- **Activos:** Para realizar su movimiento se sirven de motores o actuadores. Se trata de sistemas de control complejos en los que también se utilizan sensores.
- **Pasivos:** Para realizar su movimiento no disponen de ningún tipo de actuador ni de motores. Se valen de la acción de la gravedad y pendiente del terreno. Su principal ventaja respecto a los activos es que no requieren el uso de energía y su principal desventaja es que no pueden subir pendientes.
- **Semiactivos:** Para realizar su movimiento combinan características de los dos tipos anteriores.

## 2.3 HISTORIA DE LOS ROBOTS BÍPEDOS

El presente proyecto aborda el diseño de un robot bípedo que imite el caminar humano. Por lo tanto vamos a explicar más en profundidad cual ha sido la evolución de este tipo de robots a lo largo de la historia. Para ello utilizaremos la clasificación anterior.

Inicialmente se optó por un diseño en el cual se imitara la pierna humana donde cada una de las juntas de sus articulaciones: pie, tibia, peroné, fémur, cadera, estuviera accionada por un motor diferente. Con esta configuración se conseguía el movimiento del robot mediante la dinámica del mecanismo.

Hoy en día el diseño de robots humanoides es una de las líneas de investigación más importantes en el campo de la robótica. Se han desarrollado distintos tipos de humanoides que se detallarán a continuación que presentan características particulares dependiendo del modelo.

En cuanto a los países que participan en esta carrera, sin lugar a dudas Japón es el que ha hecho más progresos en este campo al igual que en muchos otros campos de la robótica. Los prototipos más novedosos y conocidos han sido desarrollados en Japón. En el resto del mundo son menos

los prototipos desarrollados hasta la fecha. En España cabe destacar los robots *Rh-0* y *Rh-1*.

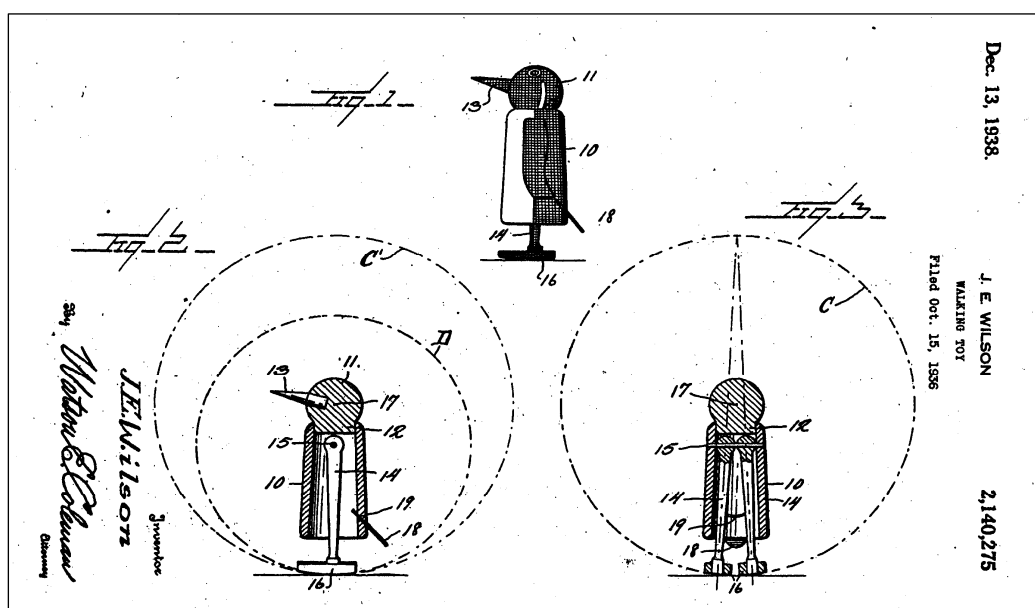
### 2.3.1 Robots bípedos pasivos

Los robots dinámicos pasivos fueron inventados y desarrollados por el ingeniero aeronáutico Tad McGeer entre 1988 y 1992. Para ello McGeer se inspiró en unos cálculos realizados una década antes por Tom McMahon en la Universidad de Harvard ayudado por un alumno suyo Simon Mochon. McMahon a su vez se había inspirado en un juguete que le habían regalado en la década de los años 1950 probablemente un “*Wilson Walkie*” hecho de madera y tela [16].



**Figura 2.21:** Wilson Walkie

*Wilson Walkie* es un juguete denominado “Pingüino caminante en rampa”, patentado por John E. Wilson y fabricado por la empresa “Walter Toys” de Watertown (EE.UU.), con una altura aproximada de 11,43 centímetros. Wilson presentó el 13 de diciembre de 1938 un plano en la Oficina de Patentes de Estados Unidos firmado de su puño y letra.



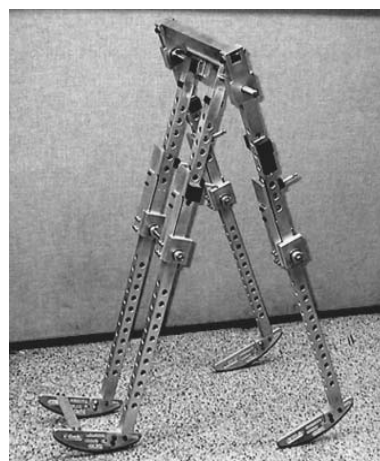
**Figura 2.22:** Plano original de la patente “*Wilson Walkie*”.

Su funcionamiento consistía en que sus piernas giraban dentro de un cono, de tal forma que cuando el juguete se colocaba en una rampa podía caminar sin necesidad de ningún actuador.

McGeer quedó fascinado con el diseño del *Wilson Walkie*, y quiso profundizar más en el campo de la robótica pasiva. Para ello fundó el grupo *Insitu* donde se dedicó a realizar naves robóticas en miniatura. La idea principal era desarrollar aparatos que no utilizaran mucha energía para moverse [17].

“Las primeras pruebas las hicimos con pequeñas máquinas que bajaban por una rampa sólo con la ayuda de la gravedad. Desde ahí fuimos agregando más dinamismo y menos motores, así hemos cortado la energía utilizada”, expresó Collins uno de los colaboradores de McGeer.

Los investigadores piensan que estos trabajos ayudarán en el entendimiento sobre la locomoción animal y la biomecánica de las piernas y los pies. “Esto nos ayudará a construir prótesis mucho más eficientes y que tomen menos esfuerzo para utilizar”, concluyó Collins.



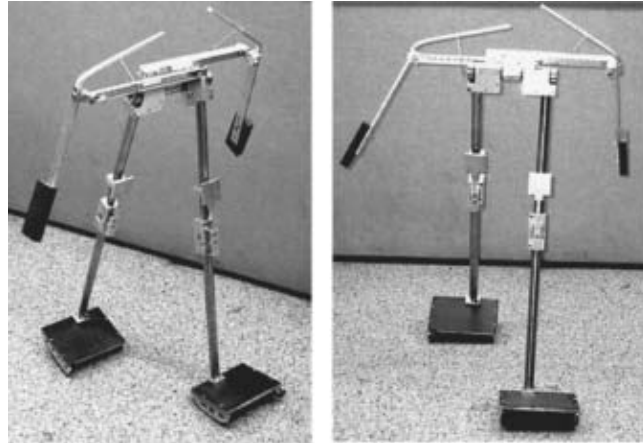
**Figura 2.23:** Robot bípedo pasivo de McGeer

A partir de los trabajos de McGeer y sus ayudantes no se ha avanzado en demasía en el campo de la robótica pasiva, si bien cabe destacar algunos modelos relevantes a lo largo de la historia.

El primer modelo que destacó fue el modelo de Martin Wisse, realizado en la Universidad de Cornell en el año 1998, con la ayuda de Andy Ruina. Wisse continuó desarrollando y evolucionando el modelo de McGeer, hasta



alcanzar un andador pasivo dinámico 3D con rodillas, basado en simulaciones en 2D.



**Figura 2.24:** Robot bípedo pasivo de Wisse y Ruina.

Tras este avance, algunas universidades han conseguido diseñar otros robots bípedos pasivos que imiten en caminar humano, mejorando el modelo de Wisse-Ruina. Tres equipos de investigación de las universidades de Cornell, Delft (Holanda) y el MIT han logrado construir robots cuyos pasos y movimiento se parecen a la forma de andar de los humanos. Fueron presentados en febrero del año 2005 en la *Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS)*, y los tres se basan en el mismo principio: suponen una extensión de varios años de investigación en robots cuyo sistema de movimiento tengan un diseño dinámico pasivo [19].

### **Robot Ranger de la Universidad de Cornell**

El Robot *Ranger* desarrollado por Andy Ruina en la Universidad de Cornell es el más pesado de todos los modelos. Sus piernas miden un metro de largo (incluyendo tobillos, rodillas y caderas) sólo es capaz de caminar hacia delante y pesa 26 libras. Además consta de dos brazos, una barra corta en el lugar del torso, una caja plana por cabeza que aloja un pequeño microcontrolador, algo de electrónica y programación muy sencilla (ya que gran parte del problema de los controles se soluciona a través del diseño mecánico

del robot), ojos de juguete y un par de baterías a cada lado. Se balanceaba como una persona con muletas, pero no se cayó. Anduvo un kilómetro en círculos por la pista de atletismo de la Universidad de Cornell. Un logro sin precedentes. Sus pies "sienten" el suelo. "No es muy inteligente", reconocía Ruina, y eso es lo extraordinario [18].

Con unos cuantos retoques de diseño, el equipo de Ruina piensa que Ranger podría andar hasta 13 kilómetros sin caerse antes de agotar sus baterías. Ruina reconoce que la tarea del caminar humano es algo muy complejo. "Nuestro cerebro y la médula espinal se combinan para sentir el terreno y mover piernas y centro de gravedad gastando lo mínimo. El bipedismo surgió al menos hace tres millones de años y puso en pie a nuestros antepasados. ¿Se puede imitar algo como eso?", reconocía el investigador.



**Figura 2.25:** Robot *Ranger*.

### **Robots Toddlers del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts)**

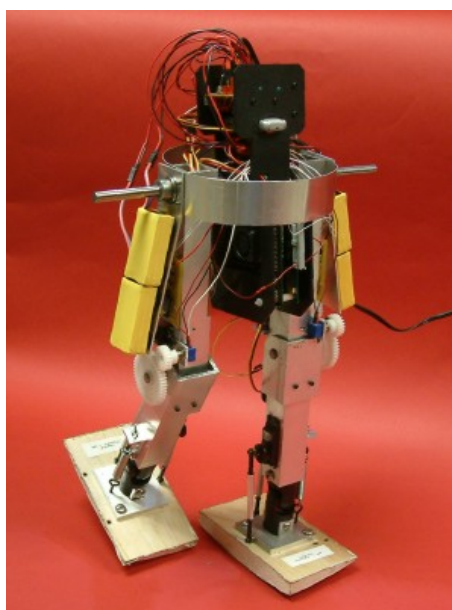
Los robots del MIT son conocidos como los "Toddlers", son los más sofisticados ya que pueden caminar en otras direcciones, pesan unas cinco libras y miden 43 centímetros de alto [19].



El *Toddler* también muestra un sistema de aprendizaje nuevo, que permite que el robot se adapte de forma continua al terreno sobre el que se mueve. Estos nuevos avances en robótica podrían transformar los actuales sistemas de diseño y control de robots, y podrían ser aplicados al desarrollo de prótesis robóticas.

El robot del MIT utiliza un programa de aprendizaje que aprovecha dicho diseño y permite que el robot se enseñe a si mismo a andar en menos de 20 minutos. Precisamente su apodo, "Toddler" (el término inglés para un niño pequeño que empieza a andar) se deriva de su capacidad de aprender a andar y la forma en la que lo hace.

Este modelo de robot es uno de los primeros robots en utilizar un programa de aprendizaje y es el primero en andar sin tener información previamente implantada en sus controles. Además el sistema de aprendizaje permite que el robot se mueva con eficacia por una variedad de superficies y, en el futuro, podría permitir que se muevan por terreno muy rocoso. Esto se debe a que el programa funciona con tanta velocidad que el robot puede adaptarse de forma continua al tipo de terreno.



**Figura 2.26:** Robot *Toddler* del MIT

### **Robot Denise de la Universidad de Delft**

Por último tenemos al robot holandés *Denise*, con 16 libras de peso y 1.5 metros de largo. Sólo camina hacia delante y su programación es muy sencilla, debido a que gran parte del problema de los controles se soluciona a través del diseño mecánico del robot. Su funcionamiento y diseño es parecido al del robot *Ranger* [19].



**Figura 2.27:** Robot *Denise*

### **2.3.2 Robots bípedos activos**

El campo de la robótica bípeda activa (*humanoides*), si ha tenido una mayor investigación y un mayor desarrollo. Los robots humanoides actuales están formados por un alto número actuadores, utilizados para controlar el elevado número de grados de libertad que poseen. Un criterio destacado sobre la estabilidad es el criterio del *Punto de Momento Cero* (ZMP) de Vukobratovic. El punto de momento cero es un concepto muy importante en la resolución del movimiento de un robot bípedo, como es el caso de los humanoides [20].

Mantener la estabilidad dinámica no es tarea fácil, ya que el torso del robot tiene más masa e inercia que las piernas, las cuales tienen que soportar todo el peso. El punto de momento cero es aquél en el que la componente



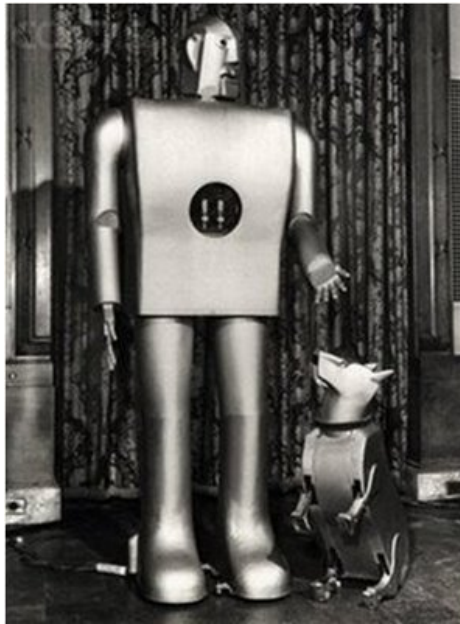
tangencial del momento resultante de la inercia, la fuerza de la gravedad y las fuerzas externas es cero. El concepto del momento cero implica el cálculo de las ecuaciones del momento angular, para garantizar que las trayectorias de las articulaciones respetan la estabilidad. Se establece una región de estabilidad, y mientras dicho punto se encuentre dentro de ella no habrá ningún problema. Dependiendo de dónde esté este punto, la estabilidad será mayor o menor.

Cronológicamente muchos investigadores y universidades han sido los que han fabricado diferentes tipos de humanoides mejorando a cada paso los progresos anteriores. En cuanto a los países participantes en este desarrollo cabe destacar sobretodo a Japón que sin duda es el pionero de los mejores diseños en el campo de la robótica.

Estos son algunos de los modelos más destacados a lo largo de la historia [20]:

### **1. ELEKTRO (1939)**

El robot ELEKTRO fue presentado en la feria mundial de 1939 en Nueva York. Podía caminar por comando de voz, hablar (usando un tocadiscos de 78-rpm), podía fumar, volar globos, y mover la cabeza y los brazos.



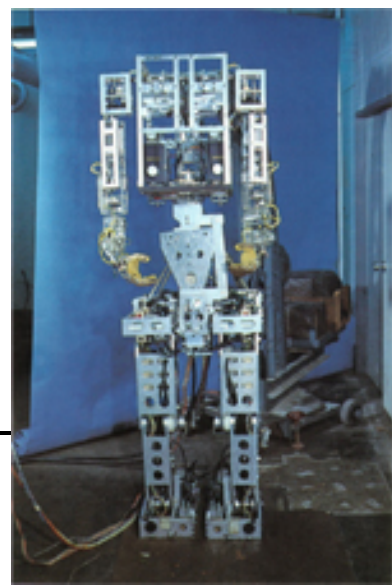
**Figura 2.28:** Robot *ELEKTRO*

En el siglo 21 los robots ya no solo cumplen un papel secundario en la ayuda industrial, sino que tienen un papel de servicios. Para este propósito, los robots requieren tener una apariencia y facultades antropomórficas. Deben tener habilidad para procesar la información como lo hacemos los humanos [21].

## **2. WABOT-1 (1973)**

Para este propósito, cuatro laboratorios del departamento de Ciencia e Ingeniería de la *Universidad de Waseda* se unieron para establecer el “Grupo de Bio-Ingeniería” el cual inició el proyecto del WABOT (Waseda roBOT) en el año 1970, dirigido por Ichiro Kato, creador del WABOT-1.

El WABOT-1 fue el primer robot antropomorfo a escala desarrollado en el mundo. Consistía en un sistema de control de extremidades, un sistema de visión y un sistema de conversación. El Wabot-1 fue capaz de comunicarse con una persona en japonés, medir



distancias y direcciones de objetos usando receptores externos, oídos y ojos artificiales, y una boca artificial. Caminó con sus miembros inferiores y fue capaz de agarrar y transportar objetos con las manos usando sensores táctiles. Se estimaba que el Wabot-1 tenía la facultad de un niño de un año y medio.

**Figura 2.29: WABOT-1**

### **3. WABOT-2 (1984)**

En el año 1980 los laboratorios que participaron en el proyecto WABOT1 se volvieron a unir de nuevo para iniciar el proyecto WABOT-2. Tocar el piano requiere el uso de una función inteligente que el robot WABOT-2 era capaz de realizar, así como las actividades artísticas, tocar el piano requeriría habilidades humanas como la inteligencia y la destreza. Por lo tanto el WABOT-2 se define como un “robot especialista”, en lugar de un robot versátil como lo fue el WABOT-1.

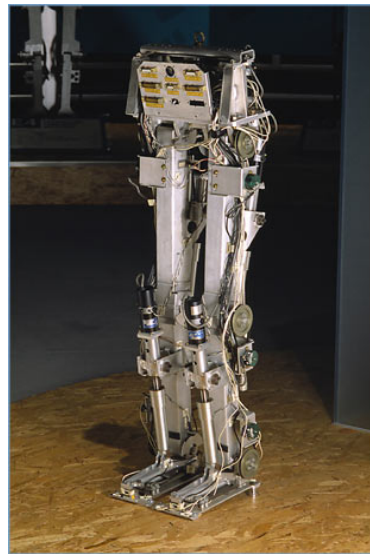
El robot músico WABOT-2 puede conversar con una persona, leer una partitura musical normal con los ojos y jugar con un juego de melodías de dificultad media en un órgano electrónico. También es capaz de acompañar a una persona mientras la escucha cantar. El WABOT-2 fue el primer hito en el desarrollo de un "robot personal".



**Figura 2.30: WABOT-2**

### **4. E0 (1986) [20], [22]**

El E0 fue el primer intento de *Honda* de crear un robot humanoide que anduviera. Este robot era capaz de andar en línea recta poniendo una pierna después de la otra, sin embargo andaba muy despacio necesitando de cinco segundos entre cada paso.



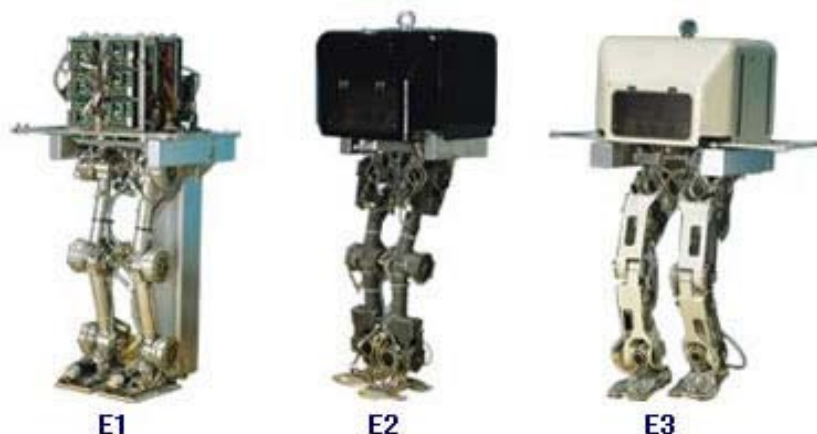
**Figura 2.31: E0**

### **5. E1, E2, E3 (1987 - 1991)**

El E1 es un prototipo que andaba en un paso estático a 0,25 Km/h con una cierta distinción entre el movimiento de las dos piernas.

El E2 de Honda tuvo el primer movimiento dinámico a 1,2 Km/h, imitando la manera de andar de los humanos.

El E3 logró una velocidad de 3 Km/h sobre superficies planas, pero todavía era necesario realizar el siguiente avance: lograr un paso rápido y estable sobre cualquier tipo de superficie sin que esto implicara la caída del robot. La investigación en los robots de la primera serie E empezó en 1986 y finalizó cinco años después.



**Figura 2.32:** E1, E2, E3

## **6. Shadow Walker (1988)**

El Shadow Walker fue desarrollado en Reino Unido por el fabricante de robots *Shadow Robot Co. Ltd.*, mide 160 cm, tiene 12 grados de libertad y en su torso están las válvulas de control, electrónica e interfaces con el computador. Su propósito es el de ayudar con la investigación y desarrollo para nuevos diseños y técnicas sobre equilibrio y locomoción humana.



**Figura 2.33:** Shadow Walker

## **7. E4, E5, E6 (1991 - 1993)**

Entre 1991 y 1993, y una vez que ya se había logrado que los robots fueran capaces de simular la forma de andar humana y caminaran a una velocidad similar, Honda desarrolló la tecnología necesaria para que además



podrían controlar el balanceo de su cuerpo y tuvieran la habilidad de avanzar sobre pisos en los que hubiera obstáculos simples.

El E4 fue un prototipo experimental más ligero que sus predecesores que era capaz de desplazarse a 4,7 Km/h, la velocidad que alcanzamos los humanos cuando caminamos a paso ligero. Honda incrementó la longitud de la rodilla a 40 cm para simular la rápida velocidad del paso humano a 4,7 Km/h.

El E5 no introdujo mejoras sustanciales en la forma de desplazarse pero se convirtió en todo un hito al ser el primer modelo autónomo de la compañía japonesa.

Hubo que esperar hasta el E6 para que Honda consiguiera por primera vez que un robot fuera capaz de controlar los balanceos de su cuerpo, cualidad que le permitía subir y bajar escaleras y caminar sobre obstáculos. Consiguió control autónomo del equilibrio en situaciones en las que el robot subía y bajaba escaleras, rampas o evitaba obstáculos. El siguiente paso una vez logrado esto es unir las piernas al resto del cuerpo y crear un robot humanoide.



**Figura 2.34:** E4, E5, E6

## **8. P1, P2, P3 (1993 - 1997)**





En 1993 los prototipos de la firma japonesa ya eran capaces de caminar de manera autónoma y de sortear obstáculos simples, por lo que el siguiente objetivo de Honda fue crear robots con aspecto humanoide. Fue entre 1993 y 1997, en una nueva generación que estuvo formada por los modelos P1, P2 y P3.

El P1 fue el primer prototipo con forma humana de Honda. Con una altura de 1,915 m y un peso de 175 Kg, el P1 se convirtió en el primer desarrollo que además de piernas tenía tronco, brazos y una cabeza. Eso supuso un salto cualitativo muy importante, ya que este robot no sólo caminaba, sino que además podía encender y apagar interruptores, agarrar los pomos de las puertas e incluso llevar objetos gracias a sus extremidades superiores. La investigación sobre el P1 comenzó en 1993 y finalizó cuatro años después.

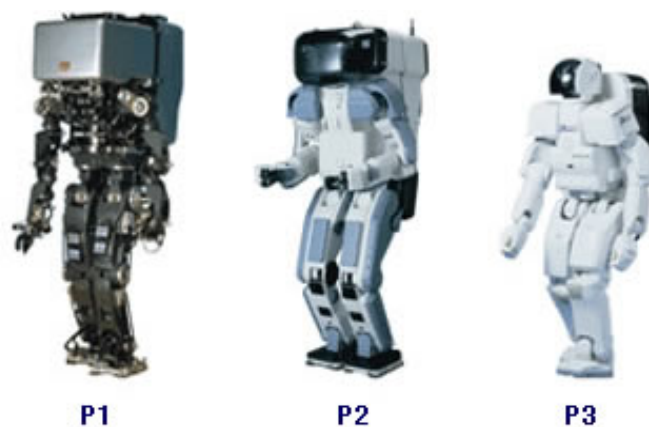
El P2 mejoró mucho desde el punto de vista estético, al mostrar un aspecto humanoide mucho más verosímil que su predecesor, pero sobre todo destacó por ser el primero en no necesitar cables para caminar, subir y bajar escaleras o empujar objetos. El P2 fue el primer robot humanoide bípedo autorregulable del mundo. Su torso contiene un computador, motores, la batería, una radio inalámbrica y otros controles necesarios para permitir el control inalámbrico.

Gracias al uso de la tecnología wireless, este robot de 1,82 m de altura y 210 Kg de peso incorporaba en su espalda una mochila con un ordenador, un motor, una batería y una radio que se encargaban de hacer funcionar al conjunto.

El P3 fue el primer robot humanoide bípedo, imitador de la forma de andar humana, completamente independiente. Fue finalizado en 1997. La altura y peso del P3 se redujeron considerablemente gracias al cambio de los materiales empleados así como el hecho de descentralizar el sistema de

control. Su pequeño tamaño lo hace mejor adaptado a los entornos de trabajo humanos.

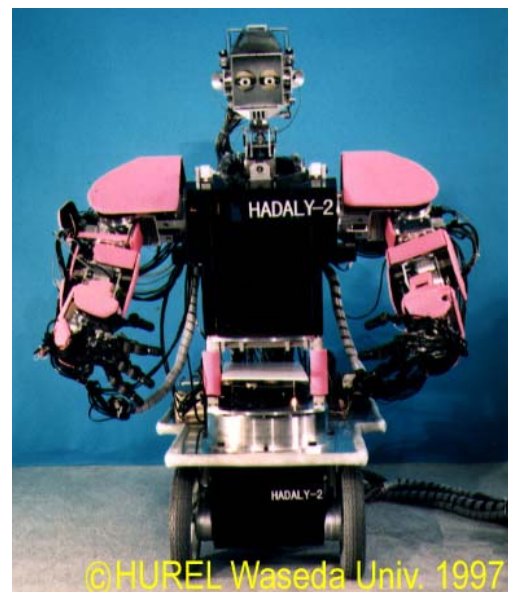
Con un aspecto más liviano, desenfadado y atractivo, el P3 fue el robot que introdujo la estética ASIMO. Con 1,60 m de altura y 130 Kg, se convirtió en el primer modelo completamente independiente de la serie y permitió a Honda presentar al gran público un prototipo visualmente muy atractivo con el que atrajo la atención de millones de personas.



**Figura 2.35: P1, P2, P3**

### **9. Hadaly-2 (1997)**

Hadaly-2 fue diseñado por la Universidad de Waseda, mide 270cm de altura, pesa 150kg y tiene 53 grados de libertad. Puede reconocer su entorno gracias a su visión, es capaz de conversar debido a su capacidad para generar voz así como reconocerla y se puede comunicar de una manera no sólo vocal sino física. Además, dispone de un imponente sistema motriz, desplazando sus 2,7 metros de altura gracias a sus ruedas.



**Figura 2.36: Hadaly-2**

## **9. HRP-1S (1998)**

El HRP-1S es similar en forma y tamaño al Honda P3, con 160 cm de altura y 130 kg de peso. Fue el primer robot públicamente demostrado de las series HRP (Humanoid Robotics Projects). Además de la habilidad de andar, posee una sofisticada coordinación de las extremidades superiores lo que le permite utilizar herramientas humanas e incluso operar maquinaria pesada.



**Figura 2.37:** HRP-1S

## **10. SDR-3X (2000)**

En Noviembre del año 2000 Sony presentó el SDR-3X. Gracias a la sincronización de movimientos de las 24 uniones de su cuerpo, este robot puede realizar movimientos básicos tales como andar, cambiar de dirección, levantarse, mantener el equilibrio sobre una pierna, golpear una pelota o incluso bailar. El SDR-3X utiliza dos procesadores RISC para “pensar” y controlar el movimiento. Mide 50.8 cm de altura y pesa 7 kg.



**Figura 2.38:** SDR-3X

## **11. ASIMO (2000)**

En el año 2000 Honda presentó la primera versión del popular ASIMO, un robot que medía sólo 1,2 m de altura y había rebajado su peso hasta los 52 Kg. Era capaz de caminar a 1,6 Km/h, podía permanecer en funcionamiento durante 30 minutos seguidos y sus baterías necesitaban de 4 horas para recargarse por completo.

El nombre ASIMO proviene de Advanced Step in Innovative MObility, es pronunciado "ashimo" en japonés y significa "piernas también". Este menudo robot es el resultado de catorce años de investigación por parte de Honda en la mecánica de la locomoción bípeda. Cerca de 40 de los 2000 modelos que existen del ASIMO están dando la vuelta al mundo mostrando su potencial en actos promocionales.



**Figura 2.39: ASIMO**

El ASIMO X2 presentado en el año 2002 posee un avanzado sistema de reconocimiento facial añadido a sus capacidades de reconocimiento por voz y gestos. Este avance es el resultado de la colaboración en la investigación con científicos en el Instituto de Robótica CMU.

En Diciembre de 2004 Honda introdujo una nueva versión de ASIMO que además de mejorarlo en su diseño exterior, y aumentar su autonomía, también permitía que ASIMO corriera a 3 Km/h. Otro importante añadido fue la incorporación de pulgares opuestos en sus manos pudiendo así coger objetos además de sentir la fuerza ejercida cuando una persona cogía su mano. Todo esto añadido a la capacidad de ASIMO de navegar en su entorno sin tener que repetidamente reconstruir un mapa interno, distinguir gente de obstáculos, y su habilidad para reconocer voces, caras, y gestos permitieron que ASIMO se acercara mucho a una posible viabilidad comercial.



Los modelos anteriores de ASIMO existen como una muestra de la impresionante capacidad de Honda es sus avances en robótica en está última década pero no tienen gran utilidad aparte de en presentaciones de entretenimiento o investigación.

En el año 2005 Honda presentó un nuevo ASIMO. Con el mismo tamaño que el prototipo del 2004, pero capaz de caminar a 2,7 Km/h (1,6 Km/h en caso de llevar un objeto de 1 Kg) y correr a 6 Km/h en línea recta y 5 Km/h en círculos. Se crea para aplicaciones profesionales tales como repartir café, entregar mensajes, empujar carritos, etc. Esto ha hecho que Honda empiece a "contratar" ASIMOs como recepcionistas en sus oficinas principales, para después comenzar a alquilarlos a otras empresas por aproximadamente 200.000€ al año.

En el año 2007 se consiguió que trabajara en equipo con otros robots como él y que pueda moverse cómodamente entre personas.

Para permitir a ASIMO funcionar en un entorno de oficina, Honda ha desarrollado una tarjeta de telecomunicación. Esta tarjeta almacena e inalámbricamente comunica información del personal, así ASIMO puede reconocer unívocamente a sus compañeros de trabajo, además de aplicar otros reconocimientos faciales o por voz para confirmar su identidad. El hecho de que ASIMO detecte la fuerza ejercida sobre sus brazos le permite aplicar presión en los carros mientras los equilibra, o coger las manos de una persona y permitir que ésta le guíe en su movimiento.

Por todo esto es obvio que ASIMO no es un juguete, está desarrollado para ser un ayudante para los humanos. Es decir, para trabajar en casa, ayudar a los ancianos, empujar a personas postradas en silla de ruedas, etc. Por último comentar que la altura de ASIMO es tal que permita establecer una



comunicación cara a cara con una persona sentada en una silla, además de poder hacer su trabajo sin parecer demasiado grande y amenazante.

## **12. H6 (2001) [23]**

En el año 2001 la Universidad de Tokio presentó el modelo H6. Se trata de un humanoide de 137 cm de altura y 55 kg de peso, con 35 grados de libertad. Dispone de motores DC para impulsar sus articulaciones, de un PC equipado con dos procesadores Pentium III-750MHz y un sistema operativo RT-Linux. Además dispone de *Ethernet* para la conexión a la red inalámbrica. Es totalmente autónomo y se puede manejar sin ningún tipo de cables externos.



**Figura 2.40: H6**

## **13. SDR- 4X (2002)**

El SDR-4X, además del reconocimiento de imágenes, sonido, tecnologías de síntesis de sonido, comunicación y movimiento, la tecnología de control basada en memoria está incluida en este robot para enriquecer la comunicación con los humanos. Este robot puede reconocer a una persona gracias a un procesamiento de imagen de su cara capturadas por



las cámaras a color, así como la procedencia de un sonido gracias a los siete micrófonos situados en el interior de su cabeza. El hecho de poseer integrada tecnología Wireless en entornos LAN, le permite sincronizar información con un PC de manera remota, con lo cual puede ir actualizando sus capacidades de reconocimiento vocal gracias a la posibilidad de ir añadiendo nuevo vocabulario a su memoria.

**Figura 2.41: SDR-4X**

#### **14. HRP-2P (2002)**

El prototipo HRP-2, alias P-Chan, fue el primer robot de tamaño humano capaz de tumbarse y levantarse de nuevo. Esto lo logra gracias a un torso flexible, análogo a lo visto en los nuevos modelos de ASIMO.



**Figura 2.42: HRP-2P**

#### **15. HRP-2 (2003)**

El HRP-2 incorpora un nuevo sistema de visión 3D llamado VVV (Visión Volumétrica Versátil) que sustituye a la configuración típica de una única cámara en la cabeza por cuatro a color y de precisión. Este hecho no sólo mejora la visión del robot, si no que le permite ver con mucho mayor grado de detalle y ampliar su campo de visión. Además del sistema VVV, se incorporó un sistema láser de medida de distancias lo que permite al HRP-2 construirse un mapa bidimensional en comparación con el



de la entrada del sistema VVV, pudiendo así rápidamente evitar obstáculos incluso cuándo éstos han sido movidos.

**Figura 2.43: HRP-2**

## **16. QRIO (2003)**

En septiembre de 2003 Sony presentó a QRIO, el ápice de su proyecto SDR. Este robot incluye una red wireless, capacidad para lanzar pelotas, reconocimiento de cara y voz, visión estereoscópica, la capacidad para evitar obstáculos, dedos independientes totalmente funcionales y mapeo visual. La mayor virtud de QRIO es su extremadamente avanzado sistema de equilibrio que le permite andar por terrenos inestables o tambaleantes. Además si QRIO se cae responde poniendo los brazos para amortiguar la caída tal como lo haría un humano.



**Figura 2.44: QRIO**

## **17. Partner (2005)**

El PARTNER es capaz de tocar la trompeta, ya que tiene la capacidad de mover sus labios como los de un ser humano. Tiene una estatura de 1.80m de altura, esto le permite cargar a una persona de un lugar a otro que fue el motivo de su creación para ayudar a las personas de la 3ª edad.



**Figura 2.45: Partner**



Además de todos estos diseños, cabe destacar dos modelos desarrollados por el departamento de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid el *Rh-0* y el *Rh-1*, bajo la financiación de la CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica) y dirigidos ambos proyectos por el profesor Carlos Balaguer [24].

Ambos modelos *Rh* (*Robot humanoide*) son muy parecidos, con la salvedad del año de fabricación y la incorporación de una carcasa protectora en el modelo *Rh-1* que su predecesor el *Rh-0* no incorporaba.

### **18. *Rh-0* (2004) y *Rh-1* (2007)**

Las características comunes a ambos modelos son:

- Tamaño natural: 1,5 m.
- Peso: 50 kg incluidas baterías.
- Dispone de 21 grados de libertad: 6 GDL en cada pierna. 3 GDL en cada brazo. 1 GDL en la cabeza.
- 2 ordenadores a bordo.
- Sensores a bordo: 2 Fuerza/Par en los brazos; 3 inclinómetros y 3 acelerómetros.
- Conexión wi-fi.



**Figura 2.46:** Rh-0 y Rh-1



## Capítulo III:

### *PROGRAMAS EMPLEADOS*



En la actualidad, todas las actividades de cualquier ámbito industrial se realizan a través de programas de ordenador. Más en concreto, en el ámbito de la ingeniería la utilización de este tipo de programas se ha hecho imprescindible, debido a la complejidad de cálculo de las operaciones que se manejan además de otras muchas ventajas. Los programas de simulación utilizados permiten obtener soluciones rápidas y efectivas a diferentes problemas de diseño planteados. Su gran ventaja radica en la obtención de datos muy fiables que permiten experimentar con simulaciones del dispositivo que se quiera diseñar, sin necesidad de construir un prototipo físico real, reduciendo así en gran parte los costes de producción y haciendo más cómoda la experimentación y optimización de aquello que se pretende implementar.

En concreto, los programas empleados para la realización de este Proyecto han sido los siguientes:

➤ **Solid Edge ST<sup>®</sup> (with Synchronous Technology):**

Programa de diseño asistido por computador (CAD). Se trata de una versión mejorada y optimizada de las anteriores versiones de Solid Edge, el programa de diseño más utilizado por las empresas de ingeniería.

Algunas de sus principales mejoras son:

- Capacidad de modificar directamente la geometría de otros CAD como Catia, Pro-E, Solid Works, Inventor, con una potencia increíble.
- Capacidad de modificar la geometría de una pieza en 3D directamente sobre el modelo con el que se está trabajando.



➤ **MSC. Adams®**:

Programa de análisis dinámico de mecanismos. Se compone de varios módulos que permiten hacer simulaciones del funcionamiento por medio de animaciones, realizar análisis de desplazamientos, vibraciones, realizar análisis de esfuerzos, etc.

Algunos de los módulos más importantes del software son:

- Adams/View. Realiza simulaciones de un mecanismo.
- Adams/Solver. Genera los cálculos para la solución de un mecanismo. Es usado por los demás módulos.
- Adams/Engine. Simulación de un motor.
- Adams/Car. Simulación de la dinámica de un automóvil.

### 3.1 SOLID EDGE ST® (with Synchronous Technology)

*Solid Edge®* fue originalmente desarrollado y comercializado por *Intergraph* en 1995 como uno de los primeros entornos basados en CAD para Windows NT. En 1998 fue adquirido, y posteriormente desarrollado, por *UGS Corporation*. En 2007 fue adquirido por la División de Automatización de *Siemens AG*, y el 1 de octubre del mismo año la empresa *UGS* fue nombrada como *Siemens PLM Software*.

Su *kernel* de modelado geométrico era originalmente ACIS, pero fue cambiado a Parasolid, el núcleo Parasolid es desarrollado actualmente por Siemens PLM software y es usado ampliamente como el motor geométrico de otras herramientas CAD's (Solidworks, IronCAD, MoldFlow, etc...).



Recientemente adquirido por *Siemens AG* está empezando a formar parte de todas sus plantas de producción e ingeniería por lo que está sufriendo unas mejoras considerables. Esta inclusión de Solid Edge dentro de Siemens está suponiendo muchos cambios funcionales dentro del software que lo están mejorando notablemente y está ayudando a que evolucione.

Dentro de las mejoras más notables en esta última versión ST cabe destacar la traducción de archivos de otras plataformas, lo que permitirá sin duda que se abra paso en sectores antes condenados al uso de un determinado software por la falta de compatibilidad de sus archivos con otros paquetes de CAD, esto le permite editar información de otras herramientas CAD (Autodesk Inventor, Solidworks, Pro Engineer, IronCAD entre otras). Entre sus similares encontramos: *Autodesk Inventor, Solidworks, Pro Engineer* [25].

Desde su nacimiento en 1995 hasta la actualidad se han lanzado al mercado 21 versiones de *Solid Edge*<sup>®</sup>, cada una de ellas mejorada y optimizada. A continuación se muestra una tabla con los diferentes años de lanzamiento de cada una de las versiones:

*Solid Edge with Synchronous Technology*<sup>®</sup>, es el software más avanzado del mercado en lo referente al diseño mecánico. Representa una auténtica revolución dentro del sector de los programas de diseño mecánico que existen actualmente en el mercado. Ayuda a los fabricantes a introducir en el mercado sus productos en el menor tiempo, con la mayor calidad y con el menor coste posible [26].

La nueva versión de Solid Edge extiende synchronous technology en el modelado central de partes y ensambles para la creación de operaciones complejas y herramientas avanzadas de edición de bocetos que reduce el tiempo total de diseño. Para mejorar la migración de datos de 2D a 3D, Solid Edge convierte las dimensiones 2D de dibujos importados a dimensiones 3D durante la creación del modelo, así, los usuarios pueden editar diseños 3D basados en la intención del 2D. Adicionalmente, Live Sections puede ser utilizada para simplificar los cambios en modelos 3D permitiendo que los

usuarios 2D editar cortes de sección a través de cualquier parte del modelo 3D, y actualizar el modelo 3D en tiempo real.

Versión	Año
V1	1995
V2	1996
V3	Primavera de 1997
V3.5	Octubre de 1997
V4	1998
V5	1998
V6	1999
V7	1999
V8	2000
V9	2001
V10	2001
V11	2002
V12	2002
V14	2003
V15	2003
V16	2004
V17	Marzo de 2005
V18	Septiembre de 2005
V19	Junio de 2006
V20	Agosto de 2007
With Synchronous Technology	2008
With Synchronous Technology 2	2009

**Tabla 3.1:** Diferentes versiones de *Solid Edge*

El Simulador Solid Edge es una nueva herramienta de análisis opcional integrada al sistema CAD que permite la validación del diseño de partes y ensambles en la etapa temprana del proceso de desarrollo del producto para



tener un tiempo de lanzamiento al mercado más rápido y reducción de costos de prototipos físicos. Está basado en el ya probado software de modelado de elemento finito Femap® y en la tecnología de algoritmo NX™ Nastran® ya integrados en la interfaz de usuario de Solid Edge. Es fácil de utilizar para diseñadores e ingenieros y promueve el incremento del uso de simulación en Solid Edge, incentivando la innovación en el diseño. El Simulador Solid Edge también aprovecha synchronous technology para facilitar la preparación de simulación de modelos y agilizar los refinamientos en el diseño.

Esta nueva versión se diferencia del resto de sus antecesoras en tres pilares fundamentales:

- *Máxima rapidez.* **Incrementa la velocidad** del diseño hasta **100 veces**, gracias a la supresión de elementos innecesarios. Además, consigue reducir hasta 8 veces el tamaño de los archivos, por lo que agiliza su funcionamiento y reduce el espacio en los servidores y tráfico de red.
- *Máxima compatibilidad.* Es el único programa capaz de trabajar sin ningún tipo de problema con proyectos realizados con diferentes programas de diseño mecánico de CAD. De esta forma no se pierde tiempo en rehacer proyectos de otros fabricantes ya que la compatibilidad con todos es real y eficaz.
- *Máxima facilidad de uso.* La imagen estándar del nuevo interface se adapta a los programas más utilizados del mundo, a los que los usuarios están más habituados (entorno Microsoft). Los comandos están adaptados ergonómicamente a la forma habitual de trabajo de los profesionales del diseño, con herramientas exclusivas y multifuncionales para aumentar su productividad.



*Solid Edge with Synchronous Technology*<sup>®</sup> supone una revolución en el diseño digital, con nuevas características:

- Máxima rapidez con el nuevo diseño interactivo.
- Nuevas herramientas para obtener resultados más rápidos.
- Diseña con cotas en 3D.
- Toda la flexibilidad que se requiere en el trabajo.
- Reconoce y mantiene la intención del diseño con Reglas Activas.
- Edita operaciones sin regeneración.
- Edita la geometría sin importar el orden de la creación.
- Edita información CAD externa más rápido que en el lenguaje nativo.
- Selecciona automáticamente geometría basada en operaciones.
- Utiliza las herramientas que realizan ediciones a cualquier modelo como si fuera su lenguaje propio.
- Aprovecha el poder de 3D con la simplicidad de 2D.



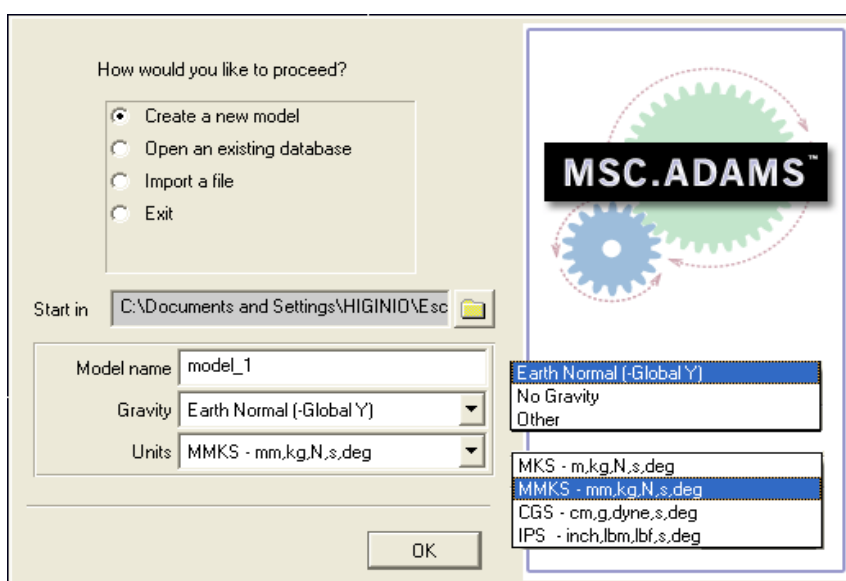
## 3.2 MSC.ADAMS

### 3.2.1 Introducción

A continuación se va a proceder a explicar de una forma básica el funcionamiento del programa de simulación MSC.ADAMS 2005 View, la interfaz, las posibilidades de diseño, de simulación, animación y obtención de resultados, todo ello acompañado de ejemplos explicativos, ya que se trata de un programa de uso no muy común al contrario que el programa anteriormente detallado.

El programa MSC.ADAMS View es un programa de simulación en tres dimensiones orientado hacia la simulación de mecanismos. Su mayor virtud es, una vez simulado el modelo, la obtención directa de todo tipo de resultados, de una manera directa y muy fiable, por lo que este ha sido el programa fundamental utilizado para la obtención de los datos, (gráficas, tablas,...) que se exponen en el presente proyecto.

Una vez iniciado el programa MSC.ADAMS View, aparecerá el siguiente menú de inicio:

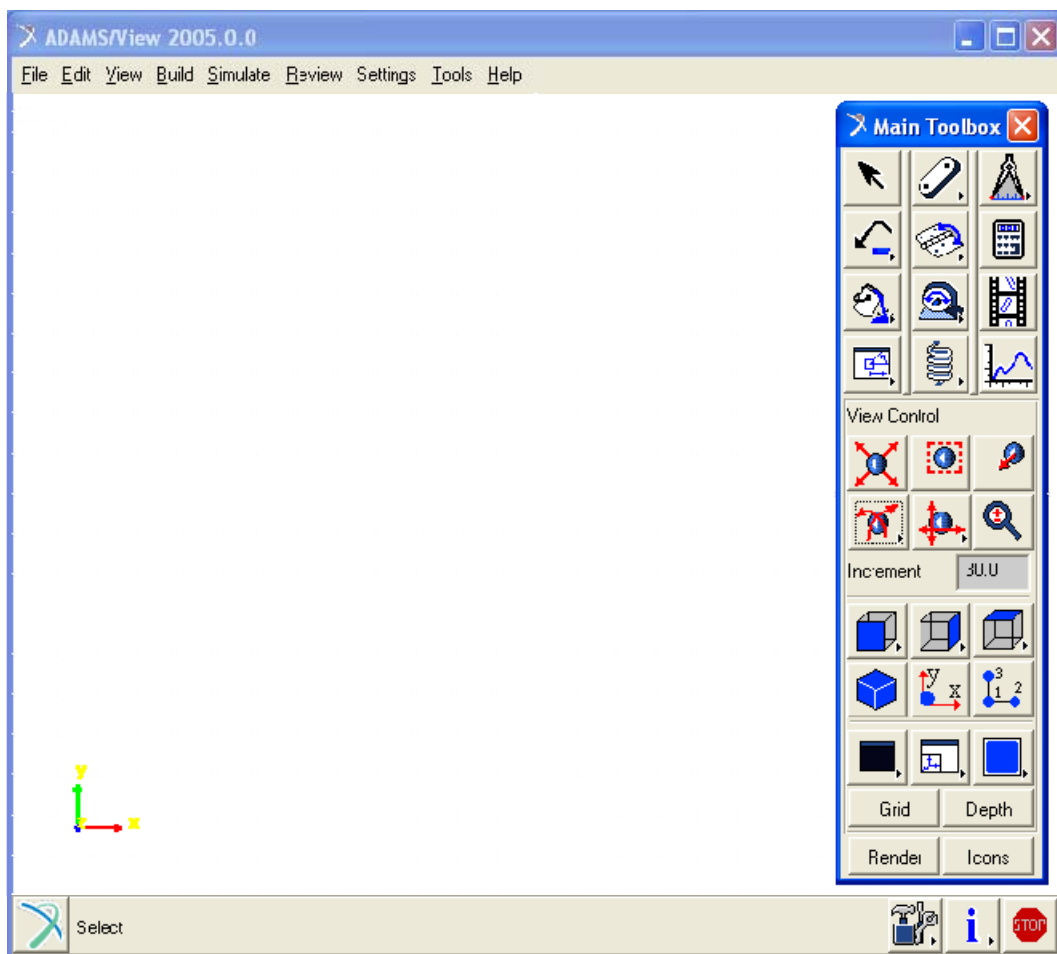


**Figura 3.1:** Menú de inicio

En ella se podrá definir iniciar un nuevo modelo, abrir una base de datos ya existente, es decir, abrir un modelo guardado anteriormente, importar un archivo o salir del programa. Además se podrá definir la carpeta en la cuál se guardarán por defecto las bases de datos creadas. Se podrá también definir el nombre del archivo, si se desea dar gravedad, (por defecto la de la Tierra), así como el sistema de unidades, muy importante para diseñar y para la obtención de resultados, MMKS (mm,kg,N,s,deg) por defecto.

### 3.2.2 Controles básicos

Si se inicia un modelo nuevo, aparecerá el espacio de trabajo, con la barra de tareas básica:

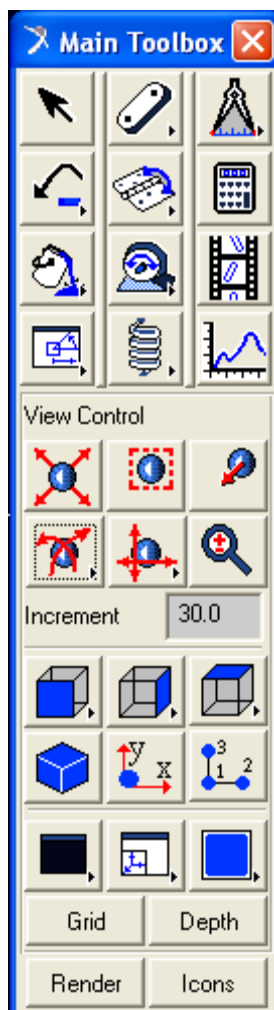


**Figura 3.2:** Espacio de trabajo y barra de tareas

En la parte superior aparecen las opciones clásicas de *FILE*, para guardar, cargar, exportar, etc; *SETTINGS*, donde se podrán configurar las unidades de trabajo, modificar la gravedad, la malla para diseñar y otras opciones y *HELP*, donde se podrán hacer consultas de sobre dudas. En *EDIT*, *VIEW*, *BUILD*, *SIMULATE*, *REVIEW* y *TOOLS* se podrán acceder a ellos de una forma básica a través de la barra de tareas ó del botón derecho del ratón.

El espacio de trabajo por defecto está situado en el plano X-Y, en  $Z=0$ , con el eje Z saliendo del plano de trabajo. La gravedad sigue la dirección del eje Y en sentido negativo.

A continuación se procederá a explicar la **barra de tareas** con sus funciones elementales:



Ésta es la barra de tareas que aparece por defecto, que es la misma que si se pulsa el cursor:



Las opciones para generar diferentes vistas del modelo son:



Con las primeras opciones, de izquierda a derecha y de arriba a abajo se puede: encuadrar, dar zoom a una determinada zona, moverse a un punto determinado, girar o rotar en el plano, desplazarse en el plano y dar zoom. Hay que aclarar que los iconos con una flecha en la parte inferior derecha son desplegados con más opciones.

Con las segundas se podrá variar el plano de trabajo, frontal o posterior, izquierda o derecha, superior o inferior o en isométrico. Además se podrá situar el plano de trabajo en un cuerpo según sus ejes X-Y ó alinear el plano por tres puntos.



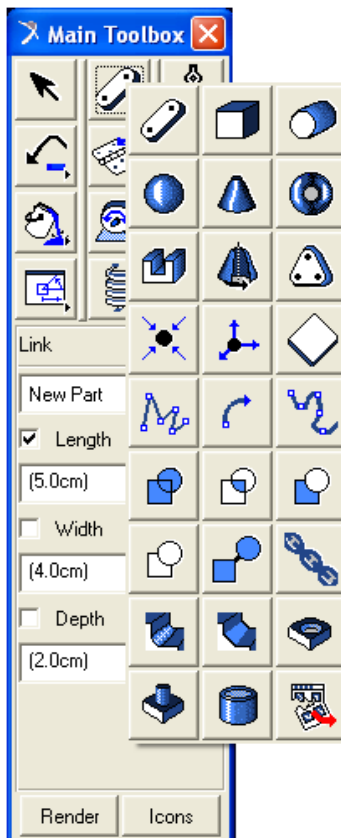
Con estos tres iconos se podrá modificar el color del fondo de trabajo, dividir la pantalla o dar más opciones.

**Figura 3.3:** Barra de tareas

Por último, con los cuatro últimos iconos se podrán realizar las siguientes funciones:

- GRID*: Se activa o desactiva la malla de trabajo.
- DEPTH*: Se cambia la perspectiva de la profundidad.
- RENDER*: Se renderizan los elementos.
- ICONS*: Rehacen visibles o no los iconos en los elementos.

### 3.2.3 Diseño y construcción



Para diseñar los elementos se utilizara el siguiente desplegable:

Las operaciones que se muestran a continuación son las básicas para el diseño en MSC.ADAMS View. Se dividen en cuatro grupos, y explicaremos únicamente las que nos han servido para nuestro proyecto. En primer lugar están las operaciones de diseño y construcción (puntos, líneas y marcadores). En segundo lugar las operaciones básicas de diseño de sólidos rígidos; en tercer lugar las operaciones booleanas para combinar piezas y por último las operaciones para modificar piezas. Hay



que destacar, que existe un menú de diseño que se puede dejar fijo si se pulsa el icono

desplegándose el siguiente menú:



**Figura 3.4:** Barra de tareas de diseño

### 3.2.3.1: Diseño de Sólidos

Los sólidos que podemos diseñar son los siguientes:



Se detallan a continuación:



**PARALELEPÍPEDO:** Primero se dimensiona la base y se extruye (profundidad “deep”). Se extruye sólo en una dirección.



**CILINDRO:** Se dimensiona de perfil y se le da la orientación deseada. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESFERA: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados.



CONO: Se dimensiona de perfil. Es recomendable predefinir sus dimensiones. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



TOROIDE: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESLABÓN: Se define su longitud entre centros de redondeo de los extremos. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Tiene las esquinas redondeadas. Se define su forma mediante una línea con el botón izquierdo del ratón, cuando se desee finalizar se pulsará el botón derecho. La placa se define entre los centros de redondeo de las esquinas. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



EXTRUSIÓN: Se define la forma mediante una línea ya creada o definiéndola con el ratón. Se extruye sólo en una dirección, por lo que debe ser definida.



SÓLIDO DE REVOLUCIÓN: Se define el eje de revolución y el perfil de revolución. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Se define como el paralelepípedo, pero ni se extruye ni tiene masa.

Como en el caso de las líneas, se podrán preestablecer las dimensiones de los sólidos. En caso de que no se pueda establecer la orientación durante el diseño del sólido, ésta será siempre perpendicular a la malla y situada sobre ella en el caso de que esté activada, y perpendicular a la vista del espacio de trabajo en el caso de que esté desactivada.

Para nuestro proyecto la única función que hemos utilizado es la *EXTRUSIÓN* que nos ha servido para crear la superficie (“suelo”) sobre la cual hemos estudiado el movimiento del pasibot y su fricción con el mismo.

### 3.2.3.2 Operaciones booleanas

Las operaciones booleanas se utilizan para combinar sólidos rígidos. A continuación se explicarán las más importantes:



**UNIR:** Fusiona dos sólidos de manera que se transforma en uno sólo. Las dimensiones de los sólidos que lo componen no se pueden modificar.



**PEGAR:** Une dos sólidos manteniendo las posiciones uno respecto de otro. Las dimensiones de los sólidos sí se pueden modificar.



**INTERSECTAR:** Al aplicar esta función el sólido resultante es la intersección de los dos sólidos definidos.



**CORTAR:** El sólido elegido en primer lugar es cortado por el elegido en segundo lugar, desapareciendo entonces el segundo sólido.

### 3.2.3.3 Modificación de los Sólidos

Las siguientes operaciones sirven para modificar los sólidos rígidos:



**CHAFLÁN:** Genera un chaflán de 45° con la anchura especificada. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



**REDONDEO:** Genera un redondeo con el radio especificado. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza con el derecho.





**AGUJERO:** Genera un agujero de radio y profundidad especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



**MACHO:** Genera un macho a modo de tornillo de radio y longitud especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



**VACIADO:** Genera un vaciado en las caras seleccionadas con una anchura de pared especificada.

Los sólidos diseñados por defecto no tendrán contacto entre sí, lo cuál es beneficioso a la hora de diseñar en 2-D, ya que no existirá interferencia entre las piezas.

### **3.2.3.4 Modificación de las especificaciones iniciales de los Sólidos**

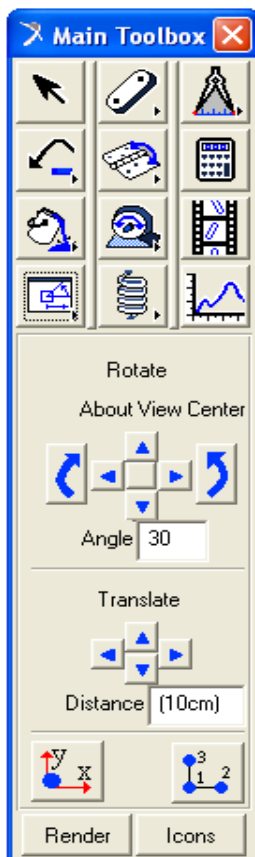
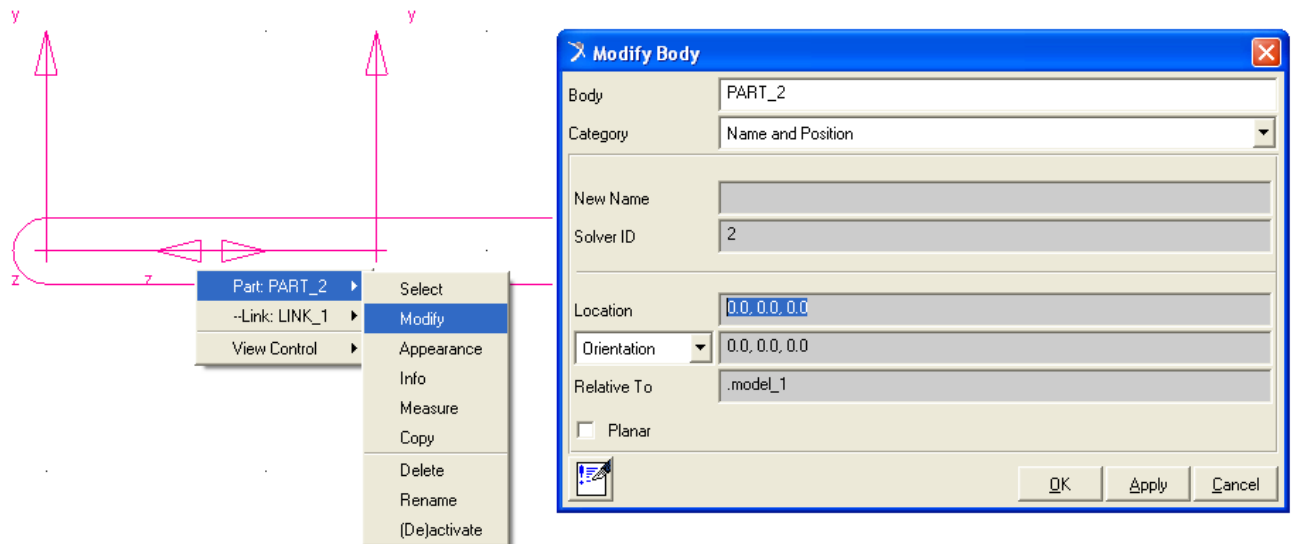
Los sólidos diseñados pueden ser modificados normalmente tanto en posición como en dimensiones, pero la forma de hacerlo depende de cómo halla sido diseñado.

La posición y las dimensiones pueden ser modificada de de dos maneras, en función de si han sido referidos a puntos o no:

- Si han sido añadidos a puntos, la posición y las dimensiones deberán ser modificadas reubicando los puntos mediante “Point Table” como ya se explico anteriormente.
- Si no han sido referidos a puntos, la posición y las dimensiones se modifican de las siguientes maneras.

## POSICIÓN:

La posición se puede modificar pinchando dos veces con el botón izquierdo del ratón o con el desplegable del botón derecho indicando la parte (PART) y Modify:



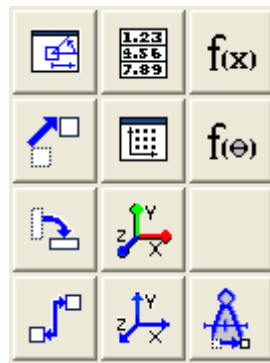
En "Category" se indica "Name and Position" y se posiciona el centro de masas de la pieza en "Location" teniendo en cuenta de que son *coordenadas locales*. Además se podrá variar la orientación del sólido en "Orientation".

Otra forma es utilizando directamente los iconos de la barra de tareas. Si se pincha en el siguiente icono:



la barra de tareas se transforma en la que aparece a la izquierda. Si se selecciona directamente el sólido que queremos con el cursor se podrá modificar su posición con las opciones que aparecen en la imagen.

Si se abre el desplegable del icono anterior aparecen las siguientes opciones:



De las opciones anteriores destacan las siguientes:



**TRASLACIÓN:** Traslada un sólido desde una posición a otra. Es conveniente utilizar los MARKERS.



**ROTACIÓN:** Gira un sólido un ángulo prefijado según un eje especificado. Es conveniente utilizar los MARKERS.

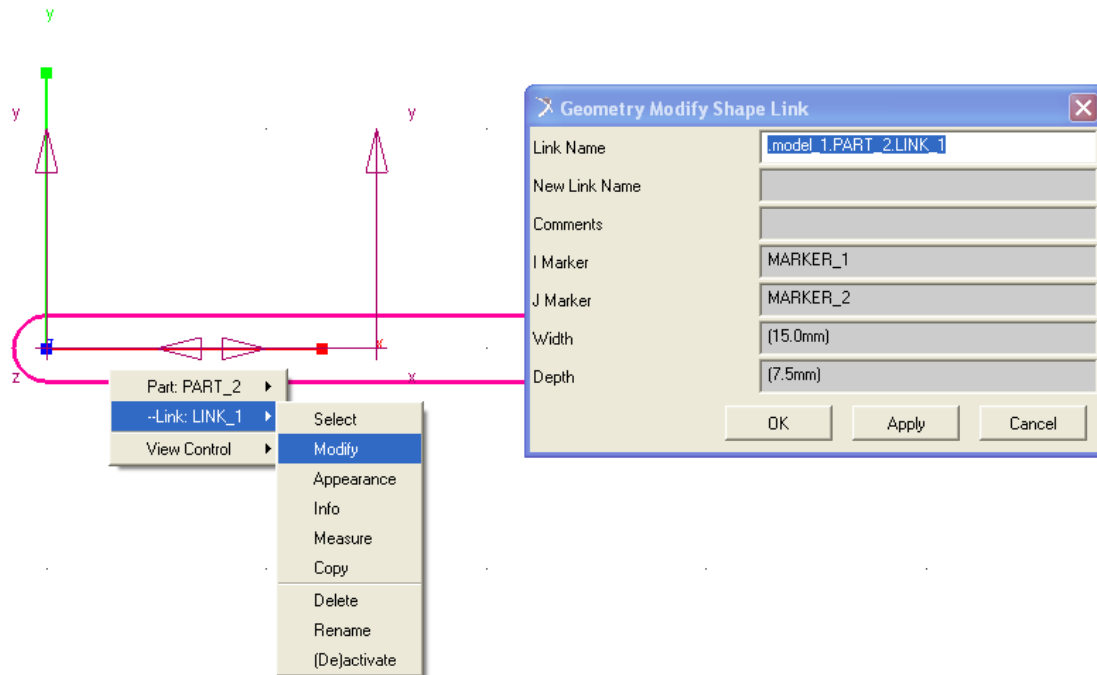


**ALINEACIÓN:** Alinea la cara elegida de un sólido respecto a otra cara seleccionada de otro.

**Figura 3.5:** Modificación de la posición

## DIMENSIONES:

Se modifican con el desplegable del botón derecho e indicando dentro de *PART* el sólido:



**Figura 3.7:** Modificación de las dimensiones

En ocasiones no se pueden modificar todas las dimensiones, por lo que se eliminará el sólido y se dimensionará de nuevo. Para eliminar un sólido se puede realizar seleccionándolo y pulsando “Ctrl + X” ó con el desplegable del botón derecho y en “Delete”. Si se quieren eliminar varios sólidos se pueden seleccionar utilizando la tecla Ctrl y seleccionándolos con el ratón y utilizando “Delete” del menú “Edit”.

Los colores de los sólidos pueden ser modificados utilizando el icono desplegable:



Durante el diseño siempre se podrá deshacer una operación errónea con el icono:



### 3.2.3.5 Diseño de juntas, actuadores y fuerzas.

Una vez diseñados los sólidos y determinado su posición se procederá a aplicar las juntas y restricciones de movimiento para que el mecanismo se comporte como se desee.

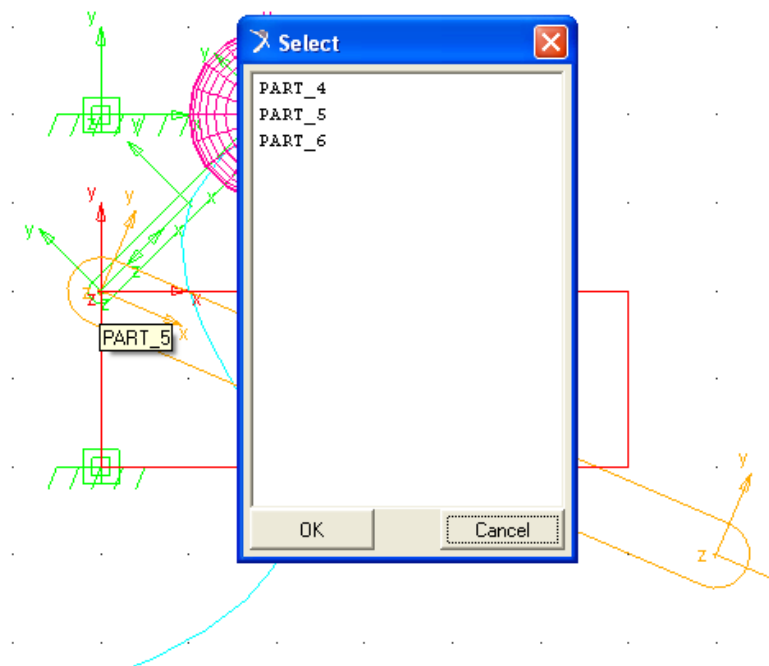
#### JUNTAS:

En la barra de tareas se dispone de las siguientes opciones:



**Figura 3.7:** Diseño de Juntas

Para el diseño de juntas en principio se dejará el menú de construcción tal y como viene por defecto, es decir, dos cuerpos y una localización. La manera de situarlas es elegir con el ratón los sólidos, o un sólido y el suelo (uno a uno) y por último la localización. En ocasiones, debido al número de sólidos, markers, puntos, etc., que hay en una determinada zona se hace difícil elegir lo que se desea, por lo que en esos casos, una vez elegida la junta se pulsará con el botón derecho en la zona donde se quiere situar y aparecerá un cuadro de diálogo como el siguiente, donde se podrá seleccionar los sólidos ó elementos de diseño si procediese:

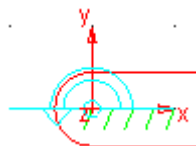


**Figura 3.8:** Selección de Elementos

De todas las juntas y restricciones se destacan las siguientes:

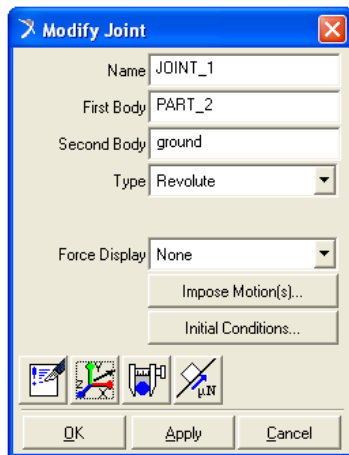


#### **JUNTA DE ROTACIÓN:**



Restringe totalmente el movimiento de traslación y la rotación en dos direcciones, permitiendo por tanto la rotación en una sola dirección. La dirección de rotación es, por defecto, normal a la malla, si está activada, o perpendicular a la vista seleccionada en ese momento si está desactivada.

Si se desea modificar pulsaremos con el botón derecho en modificar y aparecerá el siguiente menú:

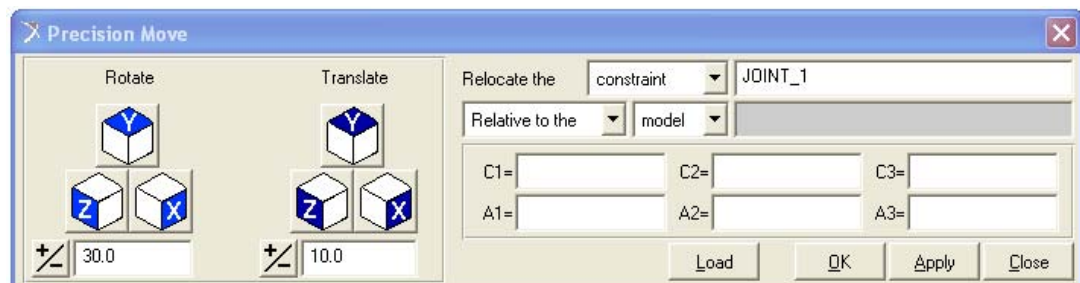


En este menú se podrá redefinir los sólidos que componen la junta, el tipo de junta, si deseamos aplicar una fuerza, realizar medidas, desplazar o girarla o incluso darle fuerza de rozamiento.

**Figura 3.9:** Juntas

Los menús de **desplazamientos** y de **fuerzas de rozamiento** son:

El menú de movimientos es el siguiente:



**Figura 3.10:** Menú de movimientos de precisión de juntas

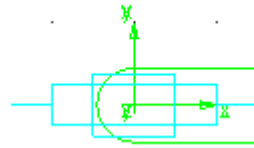
La principal aplicación de éste menú es la posibilidad de girar juntas en las tres direcciones del plano cuando la dirección especificada no es válida para el diseño.

En el menú de fuerzas de rozamiento por defecto las juntas son ideales, no tienen rozamiento, pero éste se puede definir de la forma que se desee.





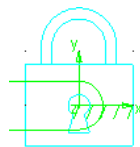
### **JUNTA DE TRASLACIÓN:**



Restringe el movimiento de tal manera que sólo se permite la traslación en una dirección. La dirección de movimiento, una vez seleccionados los sólidos (o el suelo) debe ser especificada. Los menús son iguales que el caso anterior.



### **JUNTA FIJA:**



Restringe el movimiento de tal manera que anula todos los grados de libertad de un sólido respecto de otro o de un sólido respecto al suelo.

Es importante entender que a la hora de diseñar juntas los sólidos no tienen por qué estar en contacto. La junta si ha sido diseñada correctamente no necesita que las piezas estén físicamente en contacto.

## **ACTUADORES:**

Los actuadores generan movimiento en los sólidos rígidos. Son los siguientes:



**MOTOR LINEAL:** Se debe aplicar en una junta de traslación ó cilíndrica. Genera movimiento lineal en una dirección que debemos especificar. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



**MOTOR ROTATIVO:** Se debe aplicar en una junta de rotación ó

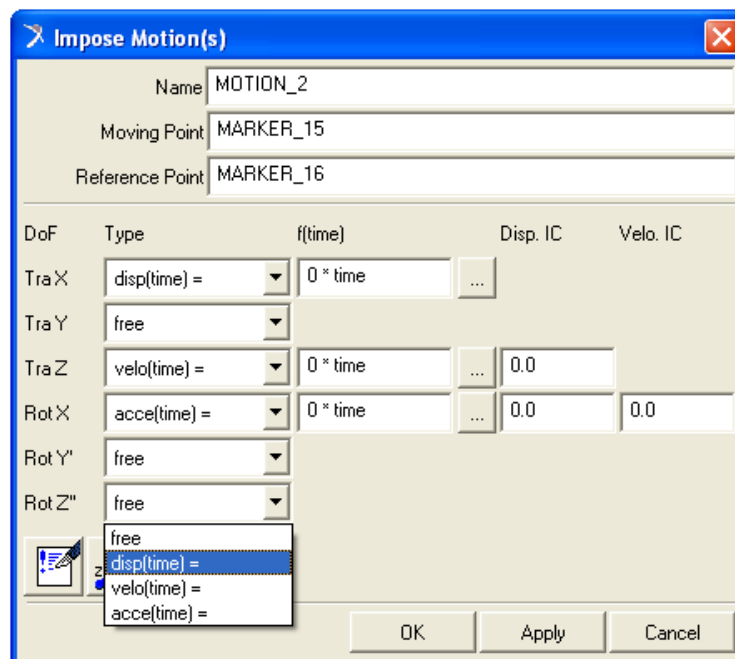
esférica. Gen era movimiento angular en la dirección de la junta. La velocidad angular debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



**ACTUADOR LINEAL DE UNA DIRECCIÓN:** Se especifica por defecto entre dos sólidos, o un sólido y el suelo, y con una dirección. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



**ACTUADOR:** Se especifica entre dos sólidos y la localización. Una vez situada aparece un cuadro de diálogo (figura 3.3.5.6) en el que se define el movimiento del actuador.

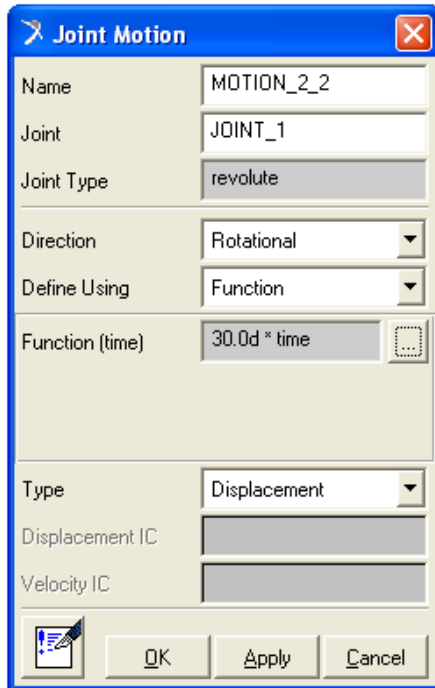



**Figura 3.11:** Cuadro de diálogo de actuadores

En él se podrá especificar el movimiento de los 6 grados de libertad, si son libres, si tienen aceleración, etc.

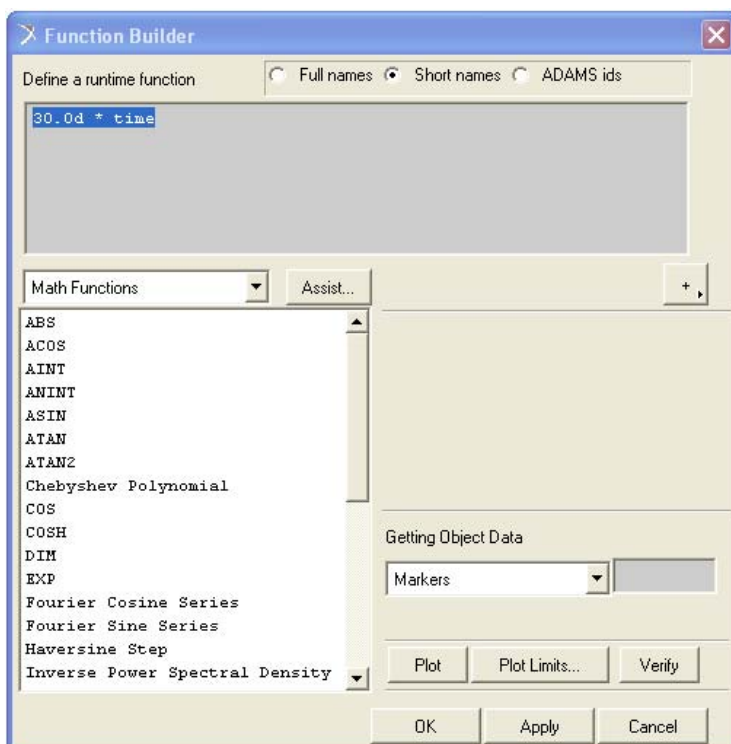
En ocasiones hay que especificar que los actuadores solo generen movimiento durante un intervalo de tiempo. Esto se puede definir de la siguiente manera:

Lo primero que hay que hacer es pinchar en el actuador y modificarlo:



En el menú del actuador se puede ver dónde está aplicada, el tipo, la dirección, la función de movimiento y si esta es de desplazamiento, velocidad ó aceleración. Por defecto son de traslación, y dependen del tiempo. Si se desea modificar la función para variar el movimiento se puede hacer directamente en el cuadro o pinchar en .

Apareciendo el constructor de funciones de la siguiente:



En el constructor de funciones se puede ver la función “30.0d \* time” donde “d” se refiere a los grados y “time” al tiempo. Si se quiere definir para que el motor solo actúe en un intervalo se utilizará la función “IF”:

**Figura 3.12:** Constructor de funciones

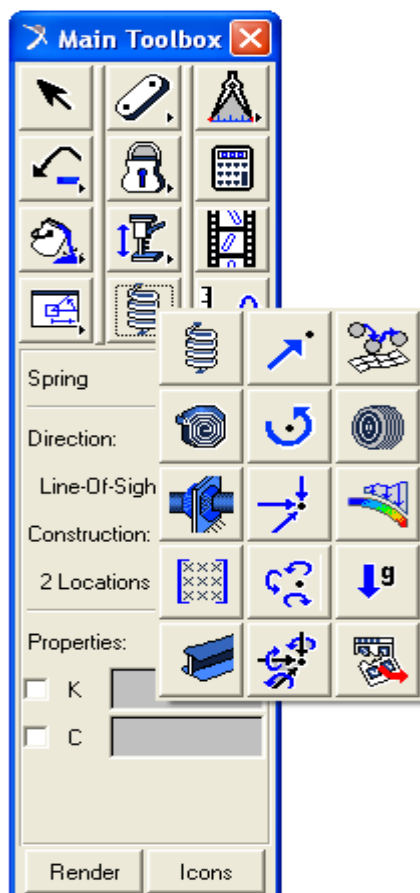
IF(time-A:B,C,D) donde:

- A: tiempo para el cuál está definida la función
- B: función que debe realizar antes del tiempo A
- C: función que debe realizar durante el tiempo A
- D: función que debe realizar después del tiempo A


El motivo de escribir la segunda función restando es que debe contrarrestar la primera para que solo actúe en el intervalo especificado.


### **FUERZAS:**


Además de los actuadores, podemos aplicar fuerzas a los sólidos para que se comporten también de una determinada forma. Las fuerzas se aplicarán con el siguiente desplegable:





Se comentará brevemente los más comunes:

 Genera una fuerza lineal en un cuerpo en una dirección indicada.

 Genera un par de giro en un cuerpo en una dirección dada.

 Genera una fuerza de amortiguamiento lineal entre dos sólidos.

 Genera un par de amortiguamiento entre dos sólidos.

 Genera una fuerza extraordinaria,

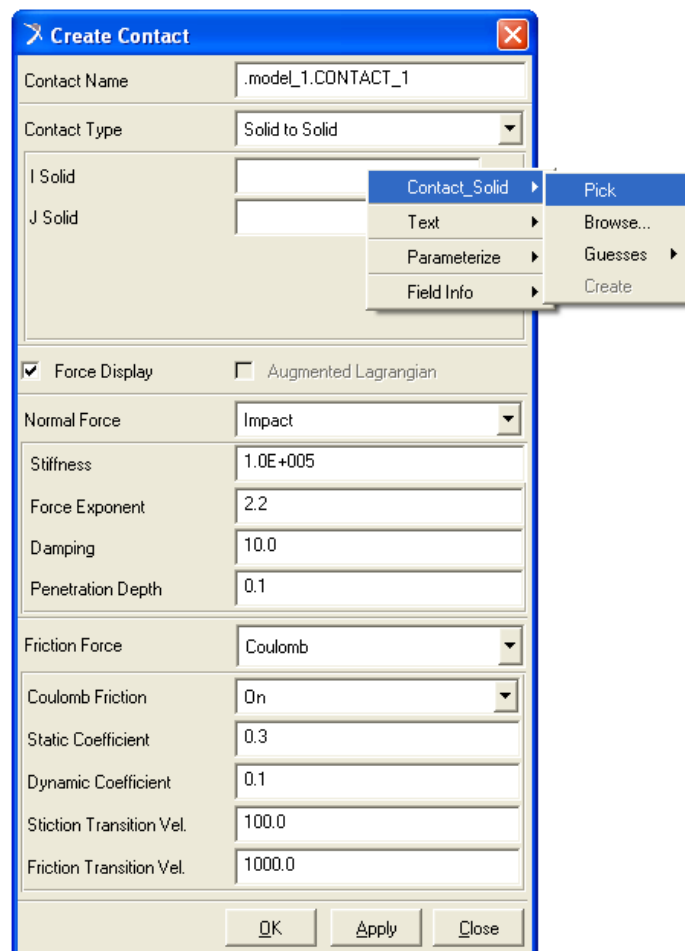
como la gravedad, pero en la dirección que se desee.

### Figura 3.13: Menú de Fuerzas

Una aplicación importantísima es la capacidad de dar contacto:



El contacto se genera entre dos sólidos con el cuadro de diálogo siguiente:



**Figura 3.14: Menú de Contactos**

Con el botón derecho, siguiendo la imagen de ejemplo, se seleccionará los sólidos en “I solid” y “J solid” que queremos que tengan contacto.

Además se podrá definir el tipo de contacto y si se desea fuerza de rozamiento.

### 3.2.4 Simulación del modelo

Una vez diseñado el modelo se procede a simularlo. Para ello se utiliza el siguiente icono, transformándose la barra de tareas en la que aparece a continuación:



Antes de simular conviene comprobar el equilibrio estático para ver si se ajusta a lo esperado.

El equilibrio se comprueba con



Para simular se define el tiempo (duración) y los pasos de la simulación. Para una simulación corta y relativamente fiable con unos 100 pasos por segundo basta. Si se quiere refinar se introducirán entre 500 y 1000 pasos por segundo.

Durante la simulación se aprecian los posibles errores de diseño, de forma que el mecanismo se comporte de forma inesperada o que surjan errores en la simulación y ésta se detenga. Si esto sucede hay que estudiar los posibles errores, resolverlos y volver a simular de nuevo.



**Figura 3.15:** Menú de simulación

Los iconos que tenemos en la simulación son los siguientes:



Sirve para iniciar la simulación



Sirve para detener la simulación en un momento dado.



Sirve para reiniciar las condiciones iniciales de la simulación. Es imprescindible pulsarlo para volver a simular.



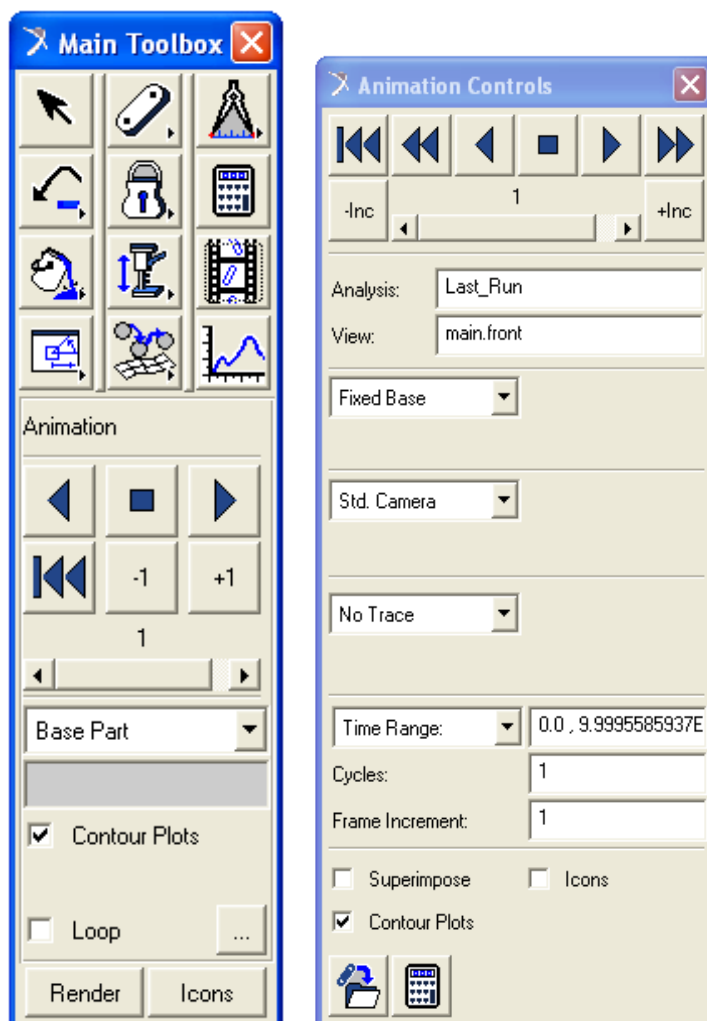
Repite la última simulación realizada.

### 3.2.5 Animación del modelo

Una vez simulado el modelo se puede visualizar con



Quedando la barra de tareas de la manera siguiente:



Con los iconos que aparecen se puede reproducir la animación, parar, reproducir en sentido inverso y reiniciar. Además, si se marca la pestaña “loop” la animación se reiniciará automáticamente cuando esta se acabe. Si se quiere dar más opciones se puede pulsar visualizando entonces el siguiente menú:

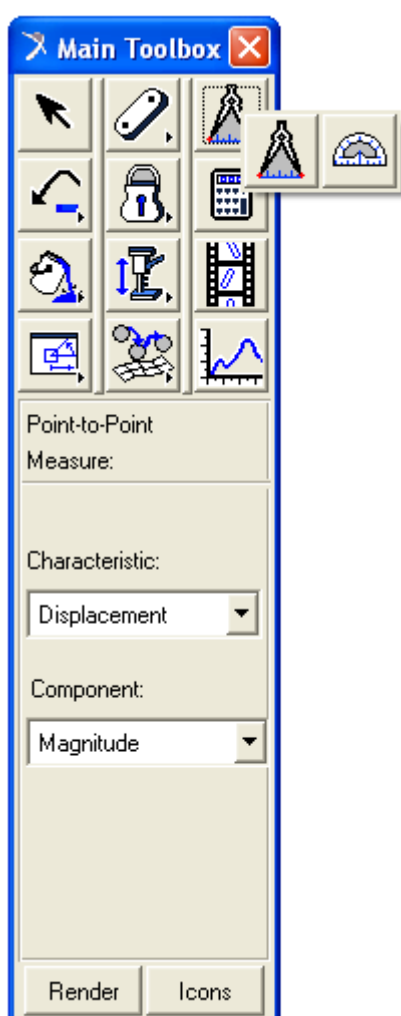
**Figura 3.16:** Menú de Animación



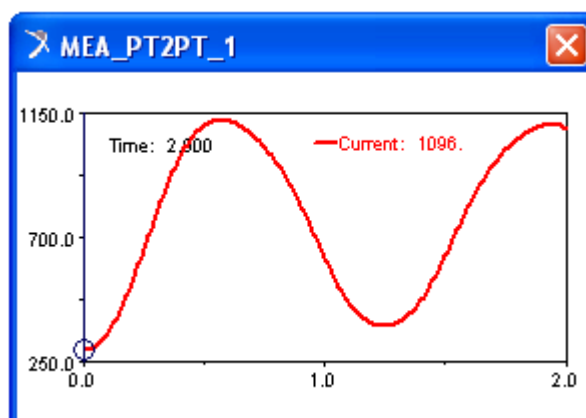
Se podrá utilizar una cámara móvil que siga uno de los sólidos o markers, generar una traza que describa el movimiento de un marker, variar el rango del tiempo de reproducción o aumentar la velocidad de reproducción usando “frame increment” con un valor entero mayor que uno.

### 3.2.6 Toma de medidas

Para la toma de medidas es imprescindible haber primero simulado.

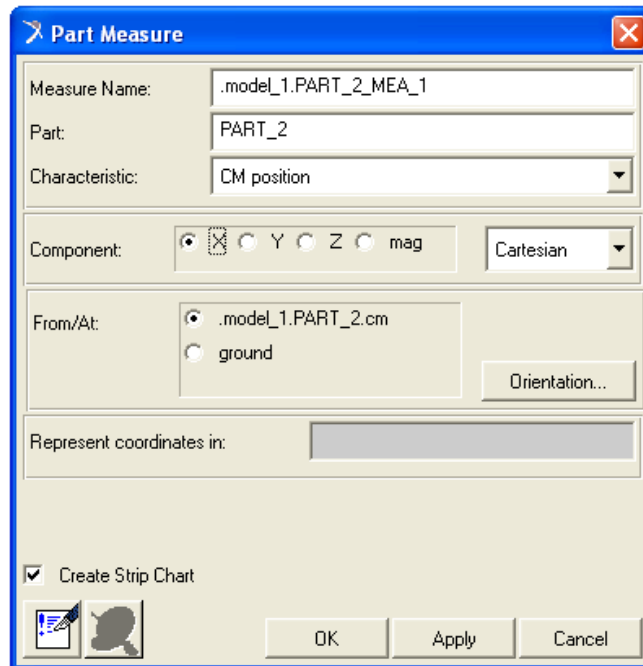


De una manera elemental se pueden medir ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones lineales entre dos sólidos utilizando los iconos que se muestran a la izquierda, apareciendo en el espacio de trabajo un diagrama como el que se muestra a continuación:



Otra forma de obtener medidas es utilizar los markers y las juntas para medir directamente sobre ellos. Para ello se seleccionará el marker o la junta, y con el botón derecho se seleccionará “Measure”, mediante el cuál se podrá obtener, según el sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico o esférico)

multitud de medidas de diferentes parámetros, como desplazamientos, posición respecto a diferentes ejes, velocidades, aceleraciones, fuerzas, pares de giro, etc.



**Figura 3.17:** Medidas

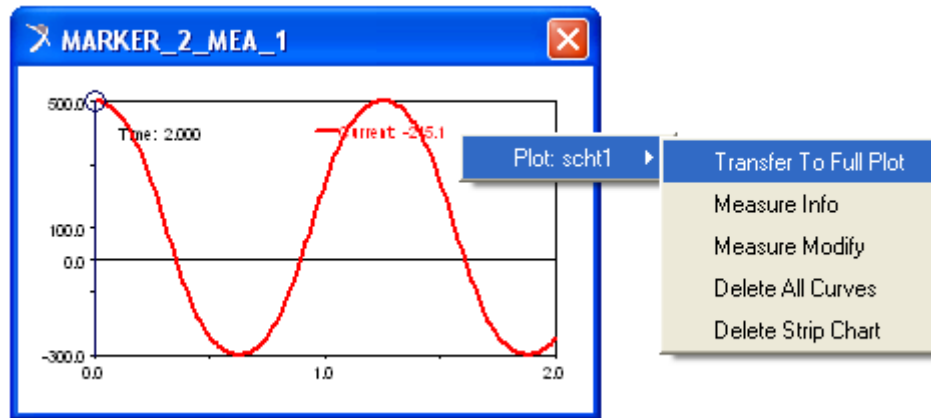
### 3.2.7 Postprocesador

Para finalizar se explicará brevemente el postprocesador de datos y como exportar los mismos.



El postprocesador es una herramienta de ADAMS:MSC llamada “ADAMS Postprocessor” que permite un estudio detallado de los resultados que se han obtenido mediante las simulaciones. Además permite visualizar también animaciones para su posterior exportación.

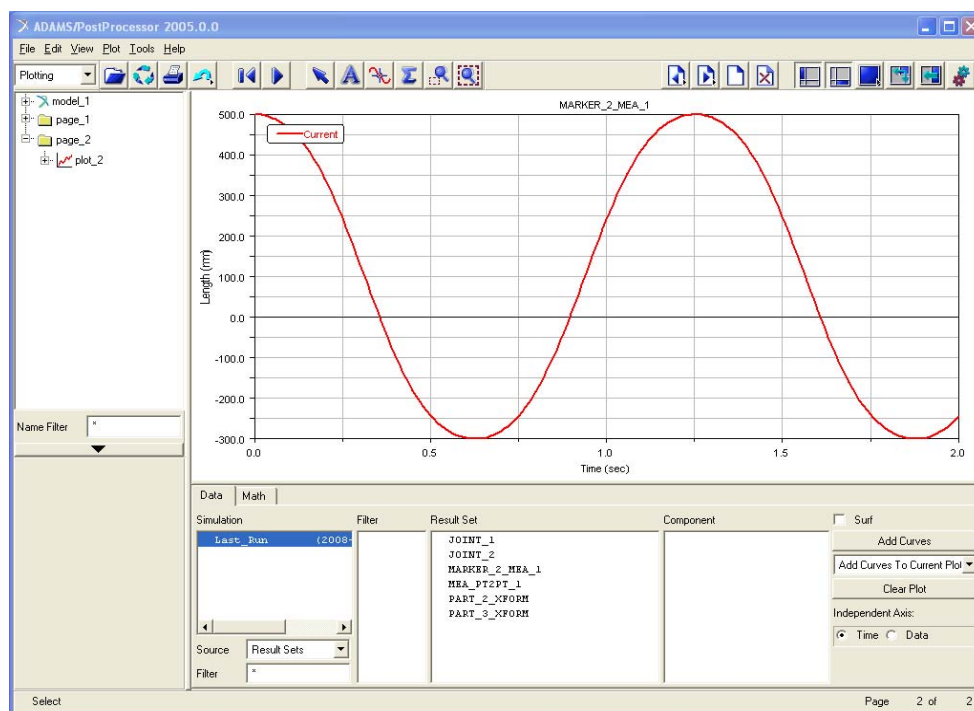
Se puede acceder a él mediante el acceso directo o directamente desde ADAMS View de una manera más cómoda siguiendo los pasos siguientes:

Cuando se toma una medida de cualquier tipo se pulsará sobre ella con el botón derecho y se seleccionará “Transfer To Full Plot” de la siguiente forma:



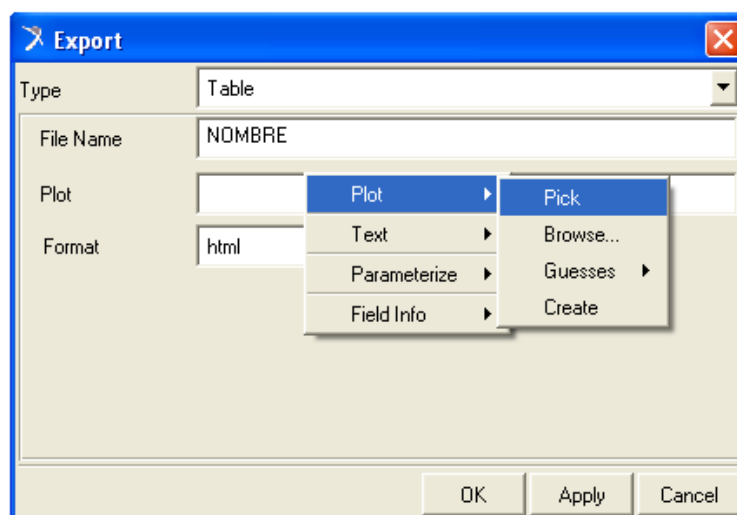
**Figura 3.18:** Paso de medidas al *postprocesador*

Una vez hecho se abrirá el postprocesador automáticamente. Todo lo que se guarde de esta forma a partir de ahora quedará guardado en la misma base de datos que estemos utilizando de manera que siempre que esté la base de datos abierta en la que la cual se esté trabajando se podrá acceder directamente al postprocesador pinchando en el siguiente icono de la barra de tareas:  y de la misma forma se podrá volver a ADAMS View con: 



**Figura 3.19:** Postprocesador

Para exportar datos se seleccionará en “File” la opción “Export”, “Table”. Entonces aparecerá el siguiente cuadro, donde se definirá el nombre del archivo y la serie de datos que se desea exportar. Para ello, tal y como se muestra, a continuación se pincha directamente sobre el gráfico.



**Figura 3.20:** Exportación de datos y archivos

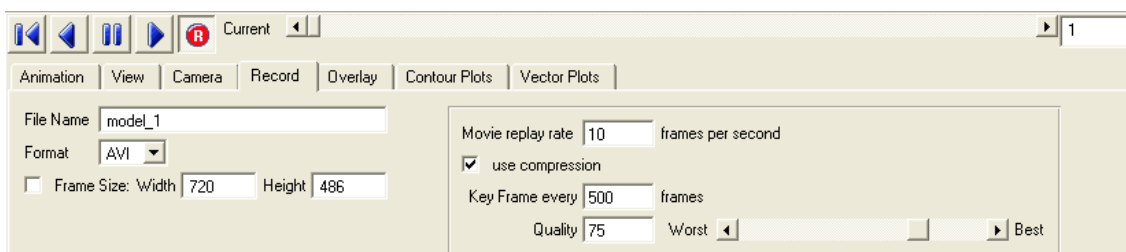
Es importante antes de aceptar, haber elegido una carpeta de destino, que será en principio la que se definió al iniciar el nuevo modelo. Si no se conoce se elegirá en “File”, “Select Directory”.

Para cargar animaciones, se pulsará con el botón derecho en cualquier parte de la gráfica y se seleccionará “Load Animation”, cargándose automáticamente la animación. Ahora se podrá reproducir, con el cuadro que se muestra, cambiar la cámara, la vista, la calidad y grabar vídeos para su exportación, lo que se hará de la siguiente forma:

Primero, en “File Name” se seleccionará el nombre de la animación y se definirá la calidad de la misma. Se pulsará el icono de grabar y posteriormente, el play:



El archivo se grabará en la carpeta seleccionada por defecto en formato AVI.

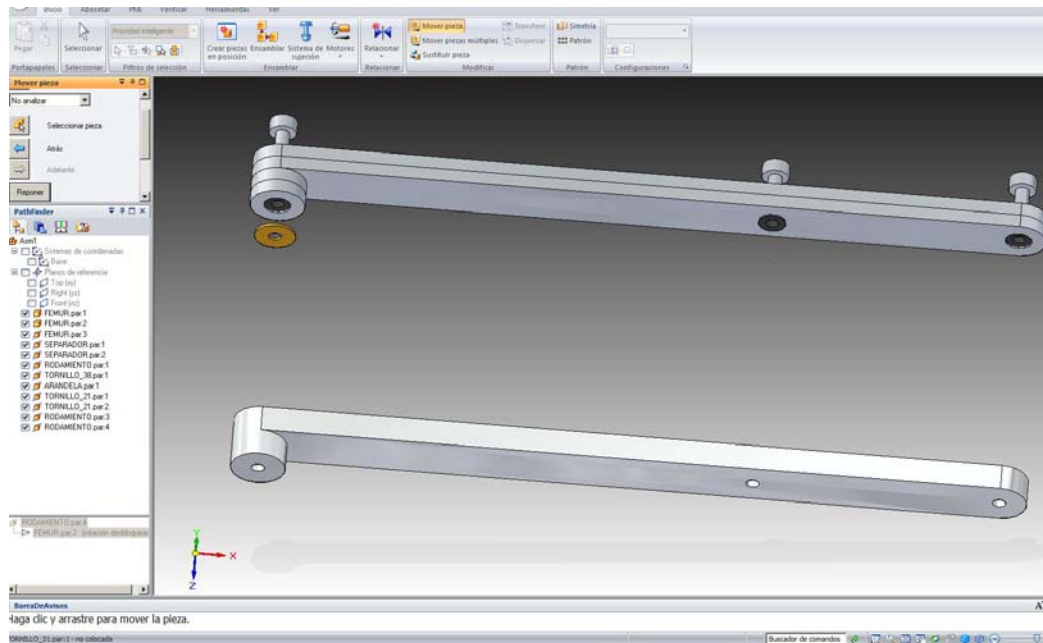


**Figura 3.21:** Grabación de animaciones

Otro proceso fundamental para la realización de nuestro proyecto es el de importar archivos de *Solid Edge ST®* a *Adams®*. Para ello hemos utilizado un modelo simplificado del “pasibot” en el que se han suprimido todo tipo de arandelas, rodamientos, separadores y tornillos, también se ha simplificado el modelo de eslabón reduciéndolo a una sola pieza en vez de las dos de las que consta el prototipo, y donde tampoco se ha exportado todo lo que es el sistema motriz (motor, engranajes, correas..etc) para evitar la sobrecarga del software.

Todo esto se ha podido realizar dado que Adams es un programa que estudia el comportamiento del sólido rígido y no tiene en cuenta ni las

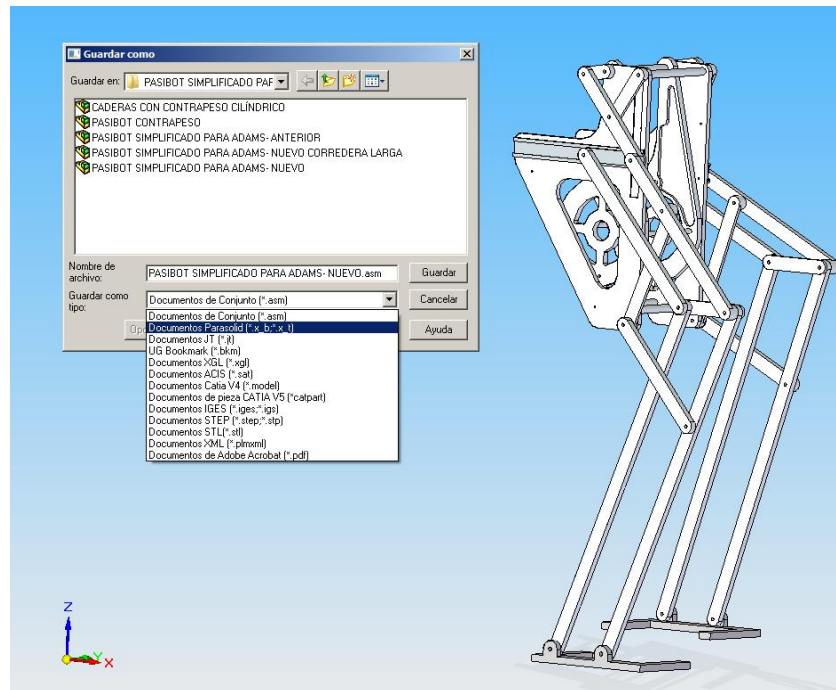
deformaciones ni el contacto entre los diferentes componentes del pasibot. Los tornillos no son necesarios ya que obtenemos la misma función con la inserción de juntas entre los diferentes eslabones quedando de este modo:



**Figura 3.22:** Simplificación del fémur para Adams

Como podemos observar con la reducción se pasa de 15 piezas a una sola. Esto facilita enormemente el manejo del conjunto en Adams.

Para la exportación guardamos el conjunto en formato ***“parasolid(\*.x b,\*.x t)”*** Este formato es compatible con Adams pero es muy importante colocar el conjunto en la posición de partida de la que se quiere estudiar el comportamiento ya que una vez exportado no se podrá cambiar de posición el conjunto.



**Figura 3.23:** Guardar un conjunto en formato “Parasolid”

De la misma forma importamos el conjunto en Adams con la operación “FILE IMPORT”, y ya tenemos el modelo listo para empezar a trabajar con él.





## Capítulo IV:

### *MODELADO DEL PASIBOT*



Después de analizar los datos proporcionados por los Proyectos estudiados con los programas *Matlab* y *Working Model*, nos dispusimos a modelar el robot para seguir estudiando sus capacidades y respuestas en otros programas como son, *Solid Edge ST* y *MSC. Adams*. La primera parte de nuestro trabajo consistió en el modelado del robot bípedo “pasibot”, con el fin de poder analizar las propiedades mecánicas del mismo, así como sus respuestas dinámicas a la hora de desplazarse.

Para el modelado de las piezas se utilizará el programa *Solid Edge ST*®. Se modelarán tanto los eslabones, necesarios para analizar el mecanismo de transmisión de movimientos, como todo el sistema motriz de transmisión de movimientos desde el motor hasta el engranaje que trasmite el movimiento a la manivela, el cual se halla dentro de las caderas. Con ello se pretende analizar de la forma más fiable posible el modelo original, (hallando así el centro de gravedad con más exactitud), para sacar las conclusiones adecuadas, que permitan una buena optimización del bípedo.

A través de estos análisis se pretende mejorar y optimizar el modelo original para:

- Evitar interferencias entre componentes.
- Optimizar las uniones entre elementos.
- Asegurar el correcto funcionamiento del nuevo modelo.

## 4.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL PASIBOT

El diseño original del *PASIBOT* fue desarrollado por el grupo *MAQLAB* del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, en el año 2007. Se trata de un diseño sencillo y optimizado de un robot bípedo, debido a que solo cuenta con un grado de libertad.

El material empleado en la fabricación de los eslabones que forman parte del robot original es *Aluminio 2024-T351*, cuyas propiedades son las siguientes:

<b>Propiedades</b>	
Densidad	2.700 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	73,5 Gpa
Coeficiente de Poisson	0,33
Tensión admisible	425 MPa

**Tabla 4.1:** Propiedades del *Al 2024-T351*

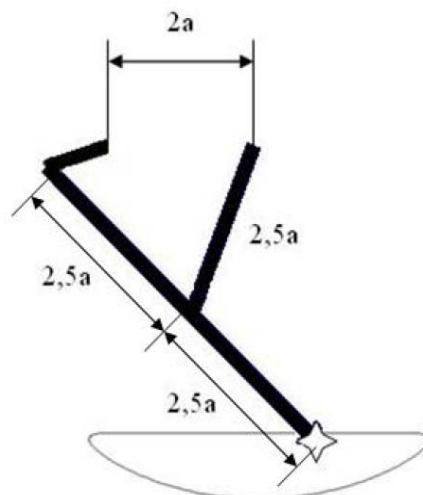
Se eligió esta aleación por tratarse de un material extremadamente fuerte, con buena maquinabilidad para uso mecánico y que, además, ha sido empleado en otros estudios universitarios como el elaborado por la Universidad Politécnica de Madrid: “*Generación de un campo de tensiones residuales de compresión en Aluminio 2024-T351 mediante tratamiento por onda de choque generada por láser*”.

El diseño está basado en dos mecanismos: el *Chebyshev* y el *Pantógrafo*. Además se le ha añadido un mecanismo *estabilizador* para mantener el robot siempre estable y paralelo al suelo. A continuación se hará una breve descripción del funcionamiento de los mecanismos, de su composición, etc.

### Mecanismo de Chebyshev

Con el mecanismo de Chebyshev, convertimos el movimiento circular del motor en la entrada del mecanismo, en un movimiento de tramo recto y curvo en la salida del mismo.

Se trata de un mecanismo simple, formado por tres eslabones: manivela motor, biela y balancín. La manivela transmite el movimiento puro de rotación a un movimiento compuesto en la biela. A continuación se muestra la representación de este mecanismo:



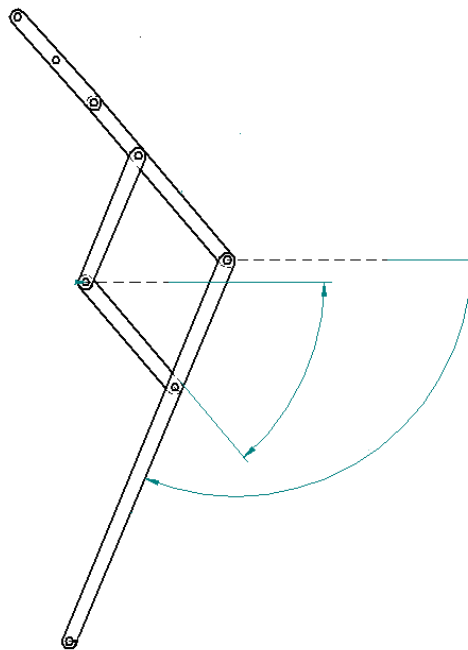
**Figura 4.1:** Mecanismo de Chebyshev

Este mecanismo es el mecanismo principal para el correcto funcionamiento del robot. Con la relación de dimensiones que se muestra en la figura anterior, se consigue transformar el movimiento circular puro que le transmite el motor a la manivela, en un movimiento de salida de la biela compuesto por un tramo casi recto y un tramo curvo. El movimiento recto se logra cuando el pie está apoyado totalmente en el suelo, y el otro pie está realizando la trayectoria elíptica que lo desplaza hacia delante para apoyar posteriormente su superficie en el suelo e invertir las funciones.

## Mecanismo de Pantógrafo

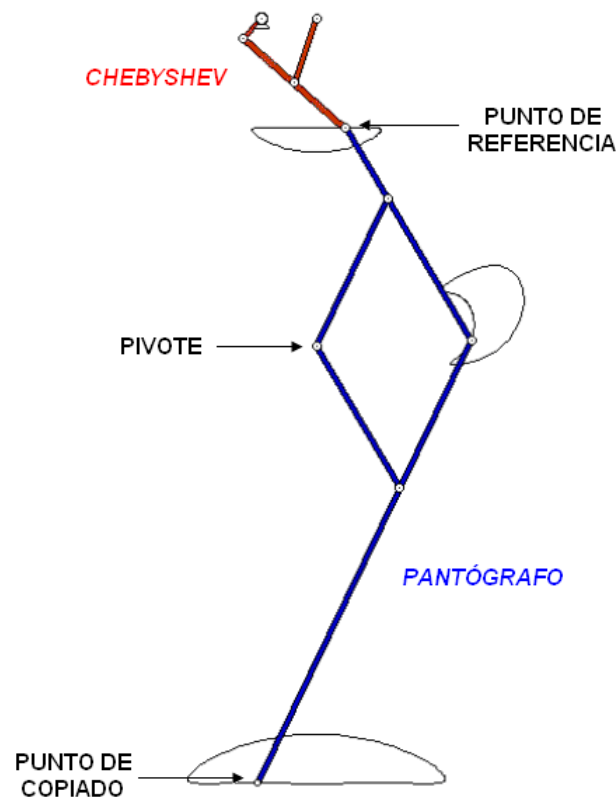
El pantógrafo es un mecanismo de origen griego basado en las propiedades de los paralelogramos. Está formado por varios eslabones (fémur, tibia y tendones) conectados entre sí de tal manera que se pueden mover respecto de un punto fijo (pivote).

El pantógrafo permite copiar una figura o reproducirla a escala distinta. Para ello se varía la distancia entre los puntos de articulación de cada uno de los eslabones, conservando siempre la condición de paralelismo entre ellos, dos a dos.



**Figura 4.2:** Mecanismo de Pantógrafo

En concreto, en nuestro Pasibot se logra aumentar e invertir el movimiento que generaba el mecanismo de Chebyshev.



**Figura 4.3:** Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo

### **Mecanismo de Estabilización**

Una vez que se ha conseguido el movimiento deseado para realizar el paso, se necesita que el robot se mantenga estable mientras realiza este paso. Para ello hay que añadir un pie al mecanismo para que soporte el peso del robot y no vuelque. La adición de este pie, lleva consigo la adición de un nuevo mecanismo que haga que el pie permanezca en todo momento paralelo al suelo. Este mecanismo está formado por los siguientes eslabones: estabilizador, contrafémur, rodilla y peroné.

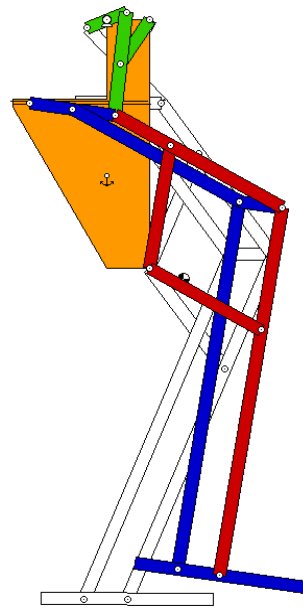


La solución original que se adoptó fue poner una corredera fija a la cadera en donde se encuentran los extremos fijos de la manivela y la biela pertenecientes al mecanismo de Chebyshev. En estudios posteriores realizados a lo largo de este proyecto, se demostró que este mecanismo no era del todo preciso, ya que el pie no permanecía en todo momento paralelo al suelo. La modificación propuesta se explica en los siguientes capítulos.

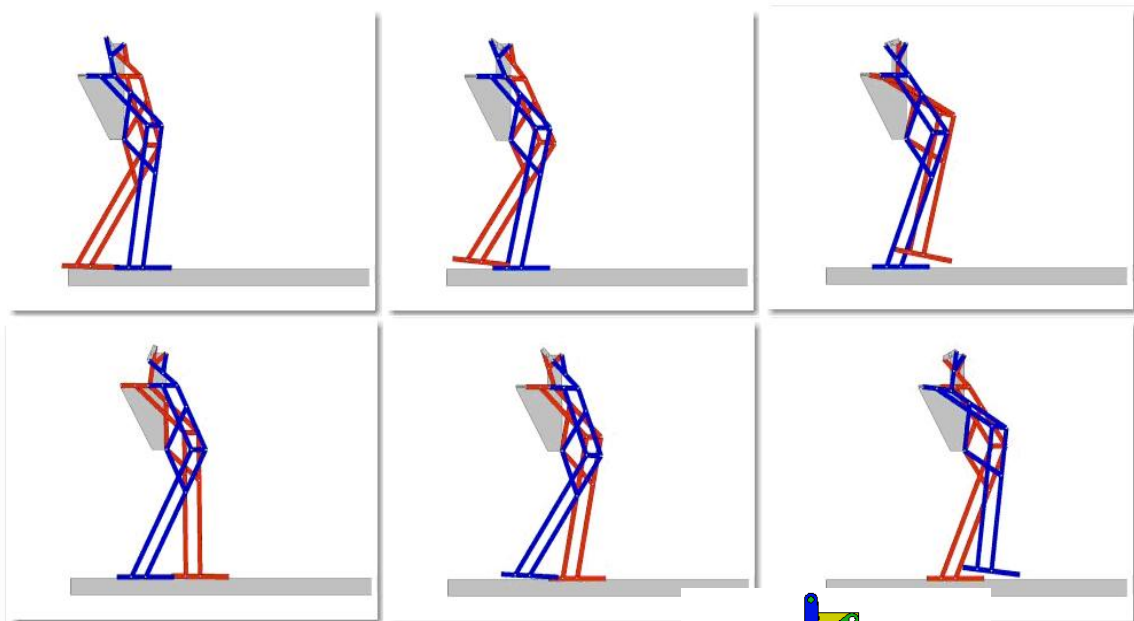
La corredera está unida a un eslabón “estabilizador”, unido a su vez con el punto de referencia del pantógrafo y también unido a un sistema paralelo al pantógrafo, el *mecanismo de estabilización*, que obliga a que el ángulo descrito por ambos eslabones sea el mismo. Esta corredera solo permite movimiento en la dirección paralela al suelo, con lo cual los eslabones transmiten a su vez este movimiento al resto del mecanismo. Ambos mecanismo terminan en el mismo eslabón, que es el pie, con lo cual este siempre permanecerá paralelo a la superficie, (posteriormente como se observa en la imagen se demuestra que no es del todo cierto).

En la imagen se puede observar en azul el mecanismo estabilizador unido mediante el eslabón “estabilizador” al pantógrafo como se describió anteriormente. En concreto en esta imagen se observa como la pierna izquierda del fondo esta apoyada totalmente en el suelo (tramo recto del periodo de recorrido de la manivela) y la pierna derecha está realizando el paso para avanzar (tramo curvo del periodo de recorrido).



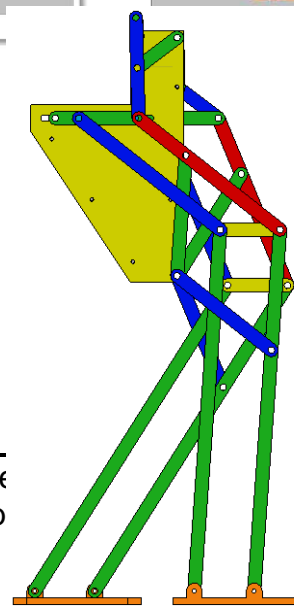


**Figura 4.4:** Chebyshev, Pantógrafo y Estabilizador  
En las siguientes imágenes se representa la secuencia del paso:



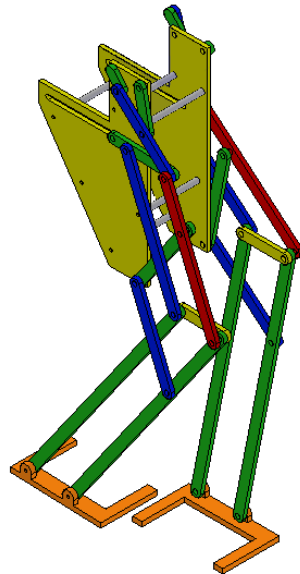
**Figura 4.5:** Secuencia del paso del Pasibot

De esta forma se obtiene el mecanismo completo de transmisión de movimientos del  
Como el robot debe de ser simétrico, una vez



Pasibot.  
que se

conoce el diseño de una pierna, se puede obtener directamente el diseño completo del robot. Por lo que el diseño del Pasibot original queda de la siguiente forma:

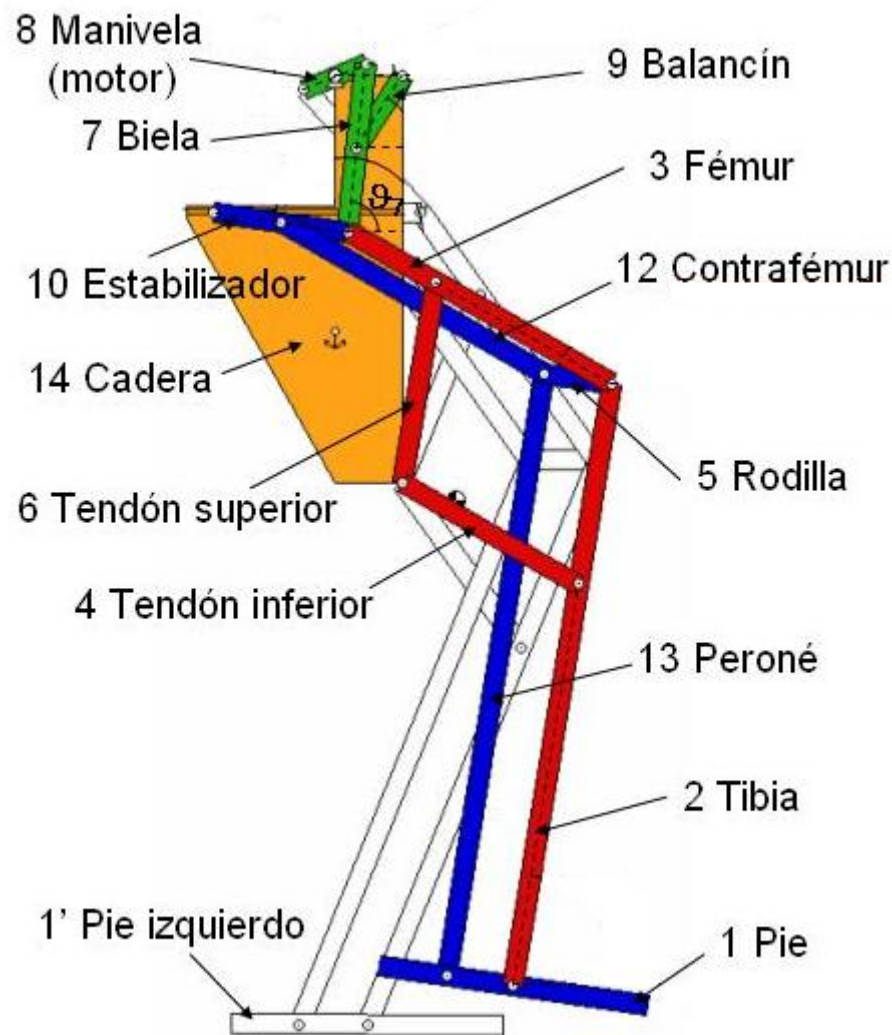


**Figura 4.6:** Pasibot original

El prototipo inicial que se observa en la imagen, (el cual no tiene en cuenta el peso del sistema de transmisión alojado en las caderas), tiene un peso total de 5,077Kg, para el material anteriormente descrito *Al 2024-T351*.

Una vez que ya se tiene construido el prototipo, se le asignan los nombres a los eslabones para identificarlos y diferenciarlos del resto en los análisis posteriores que se realizarán.

Estos nombres son los siguientes:



**Figura 4.7:** Nomenclatura de los componentes del Pasibot

## 4.2 MODELADO DEL PASIBOT

Una vez que se ha explicado el proceso de diseño del Pasibot, se procede a explicar el proceso de modelado del mismo. En este proceso intervinimos 4 colaboradores:

- Víctor Espantoso Miranda
- Carlos Hernández Molina
- Óscar García de Oteiza



- Javier Pérez Caballero

Para el modelado de las piezas, primeramente se tuvieron que medir con la ayuda de calibres y escalímetros todas y cada una de las piezas para realizar una recreación lo más fiable posible del robot. Las piezas con todas las cotas se encuentran en los *Anexos* al final del documento.

Los distintos componentes del Pasibot se han diseñado de tal forma que cuando estén montados formando una pierna, todos queden contenidos en el mismo plano. Se han dividido las piezas en tres grandes grupos:

- Elementos comunes
- Elementos de unión y sujeción
- Elementos motrices y sistema de transmisión

A continuación se explican las características y los distintos componentes que integran cada uno de los grupos anteriormente mencionados.

#### **4.2.1 Elementos comunes**

Los elementos comunes son todos aquellos que forman parte del diseño original del Pasibot, y que son necesarios para describir el movimiento de paso que se pretende conseguir. Se trata por lo tanto de todas las piezas que integran los mecanismos del robot: Chebyshev, Pantógrafo y Estabilizador, excluyendo los elementos de unión presentes en otro grupo. De todos los

eslabones que se muestran a continuación hay dos de ellos en cada pierna para reforzar la estabilidad y resistencia del robot.

### **A) Caderas:**

Las caderas sirven de soporte físico para el mecanismo de Chebyshev y el sistema de transmisión. A través de ellas se transmite el movimiento desde el motor a la manivela motriz que acciona el mecanismo.

El diseño original estaba formado por una sola pieza. La mejora del diseño incluye dos elementos que forman la cadera, la cadera exterior y la cadera interior. Estas dos piezas están presentes en ambas piernas.

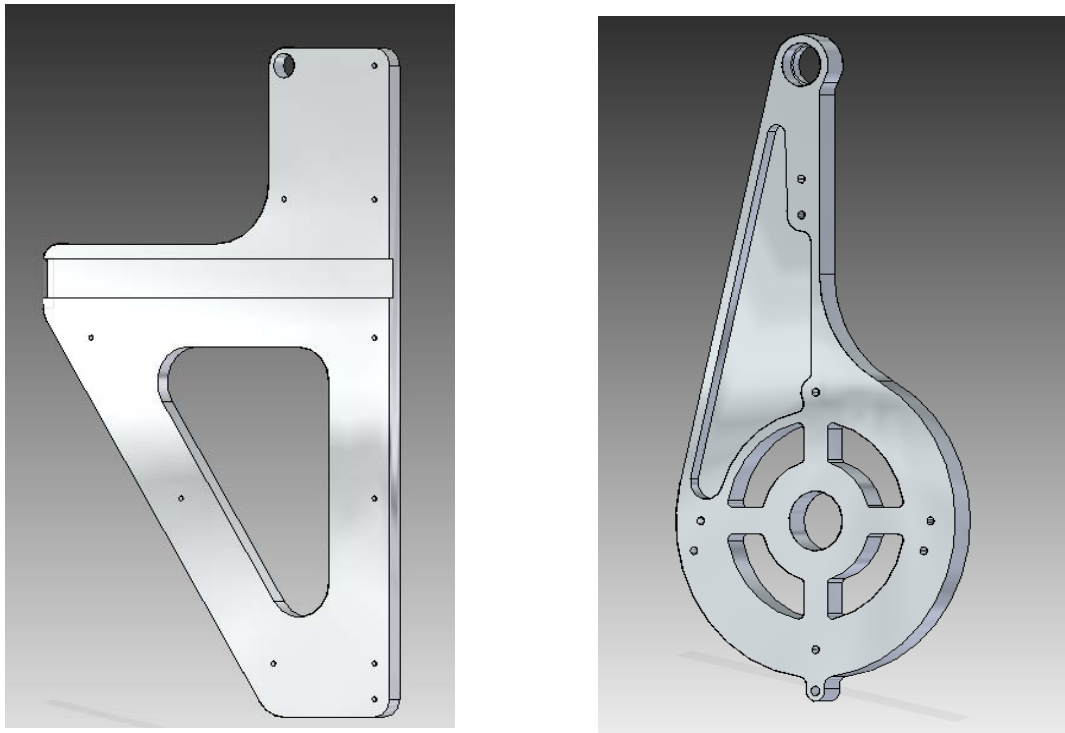
La cadera exterior es la que comunica el eje primario (motriz) con la manivela del Chebyshev, (agujero superior izquierdo). Sirve de soporte físico también para el balancín del Chebyshev, (agujero superior derecho) y para el punto fijo (pivote) del Pantógrafo, (agujero inferior derecho). Además lleva alojado el raíl en el que se aloja la corredera, sobre la cual desliza la deslizadera para mantener la trayectoria del pie paralela al suelo. El resto de los taladros sirven de topes de separación entre caderas.

La cadera interior sirve de soporte físico para el motor y el engranaje primario. Se comunica con la cadera exterior a través del agujero del eje primario.

### **Características:**

<b><i>Cadera exterior derecha</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,849 kg

<b><i>Cadera interior derecha</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,515 kg

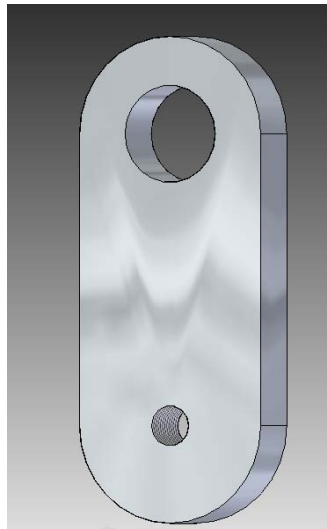


**Figura 4.8:** Cadera exterior derecha y Cadera interior derecha

### **B) Manivela:**

La manivela es el eslabón motriz del conjunto. En su punto de unión a la cadera tiene un movimiento circular proveniente del motor. En su otro extremo se une a la biela para realizar el movimiento de Chebyshev y transmite a través de ella el movimiento a todo el resto del mecanismo.

<b>Manivela</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,011 kg

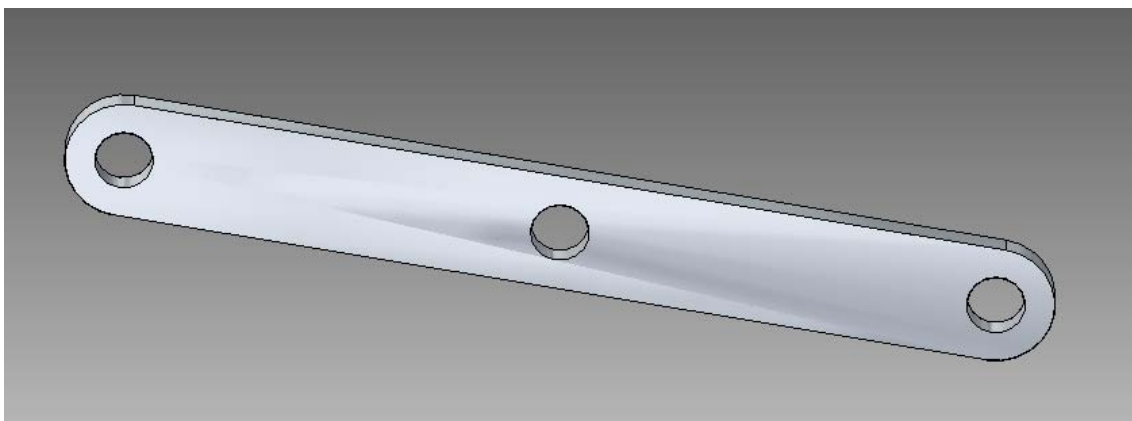


**Figura 4.9:** Manivela

**C) Biela:**

La biela engancha en su punto superior con la manivela transmitiendo el movimiento al resto del mecanismo. En su punto medio engancha con el balancín y en el último con el estabilizador y el punto de referencia del Pantógrafo. Por lo tanto transmite el movimiento al balancín, (realizando el movimiento del Chebyshev) y también transmite el movimiento al Pantógrafo.

<b>Biela</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,083 kg

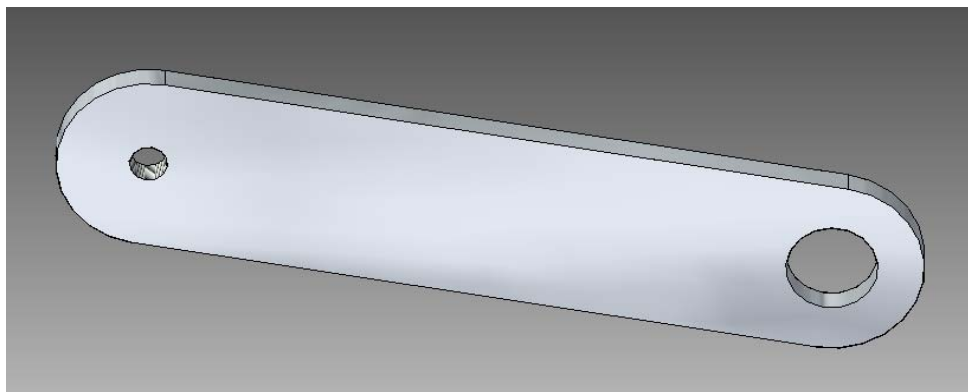


**Figura 4.10: Biela**

**D) Balancín:**

El balancín engancha con el punto medio de la biela y en su otro extremo con la cadera formando un punto fijo pivotante. Se trata de una pieza fundamental para realizar el movimiento de tramo recto y elíptico propio del Chebyshev.

<b>Balancín</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,047 kg



**Figura 4.11: Balancín**

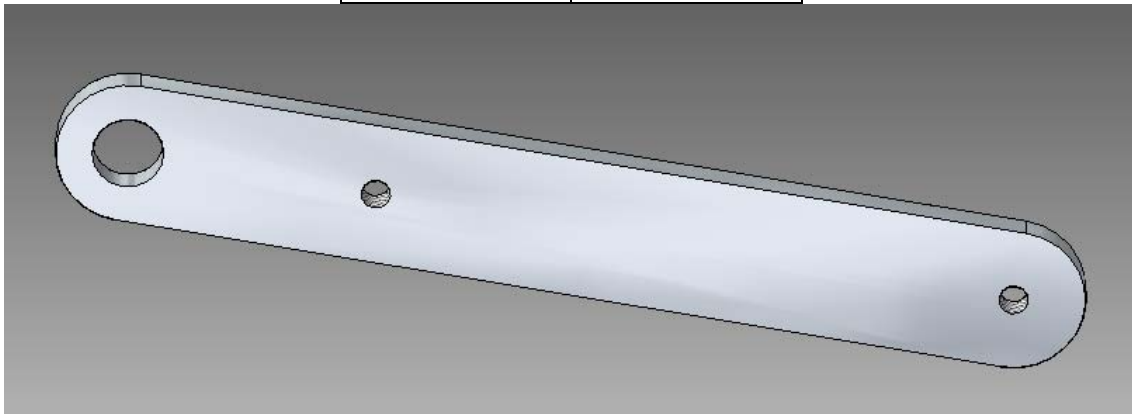
**E) Estabilizador:**

El estabilizador es el eslabón encargado de realizar la trayectoria paralela al suelo de los pies para mantener el equilibrio del robot. En sus dos orificios más pequeños engancha con el fémur (correspondiente al Pantógrafo) y el contrafémur (correspondiente al mecanismo Estabilizador). En el agujero más grande engancha con la deslizadera que se desliza sobre la corredera que mantiene la trayectoria de los mecanismos siempre recta.

<b>Estabilizador</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>



<i>Masa</i>	0,037 kg
-------------	----------

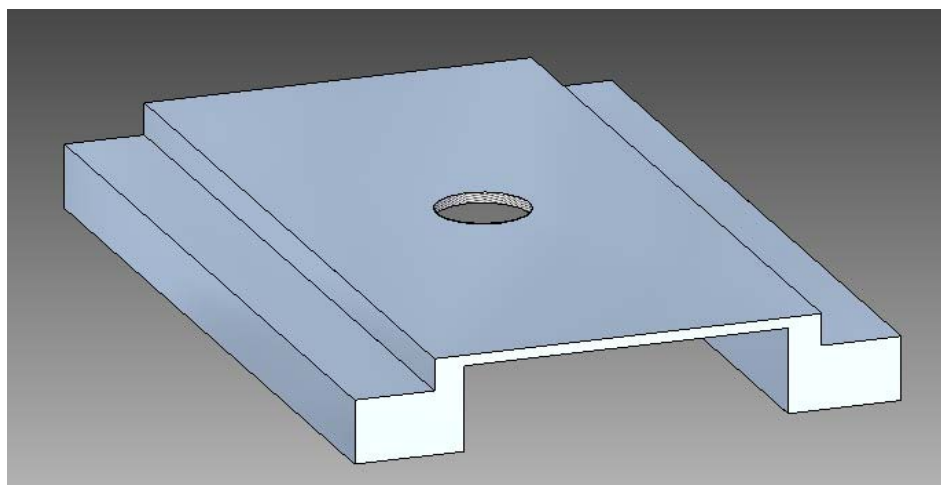


**Figura 4.12:** Estabilizador

**F) Deslizadera:**

La deslizadera sirve de guía para realizar la trayectoria del estabilizador sobre la corredera. Esta trayectoria es siempre recta debido a la forma de la corredera.

<i><b>Deslizadera</b></i>	
<i>Material</i>	Acero
<i>Densidad</i>	7.833 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,011 kg

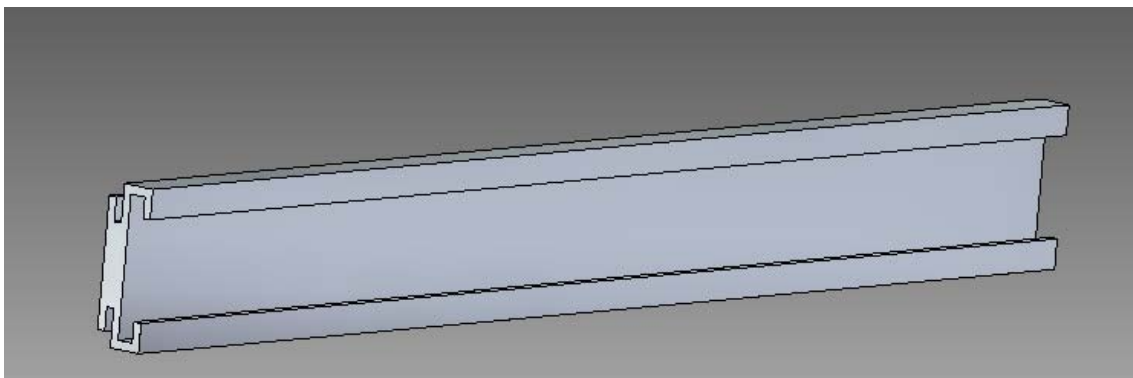


**Figura 4.13:** Deslizadera

### **G) Corredera:**

La corredera está alojada en el raíl que forma parte de la cadera exterior. Es el soporte físico por que desliza la deslizadera del estabilizador realizando el movimiento rectilíneo de su forma.

<b>Corredera</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,074 kg



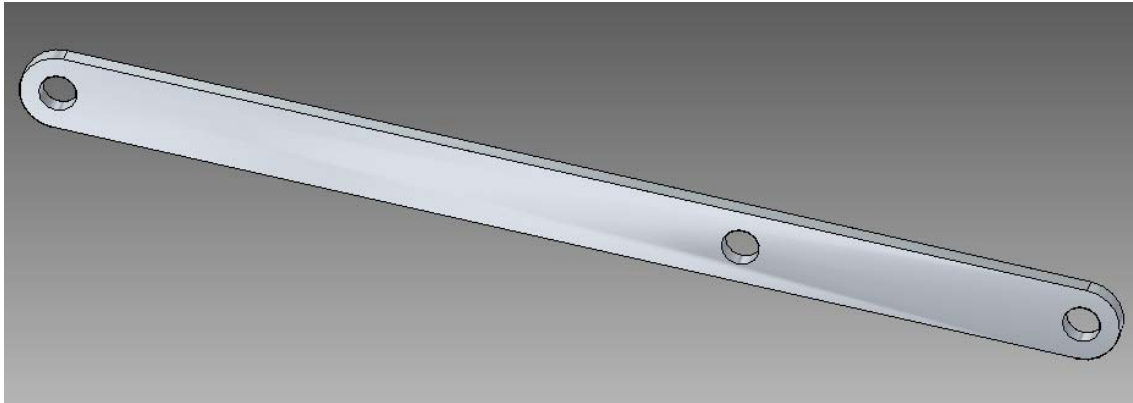
**Figura 4.14:** Corredera

### **G) Fémur:**

El fémur está conectado en su parte superior con el estabilizador y la biela, en su parte central con el tendón superior y en su parte inferior con la tibia y la rodilla. Es uno de los elementos que hace posible el correcto funcionamiento del mecanismo de Pantógrafo.

<b>Fémur</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>

<i>Masa</i>	0,149 kg
-------------	----------

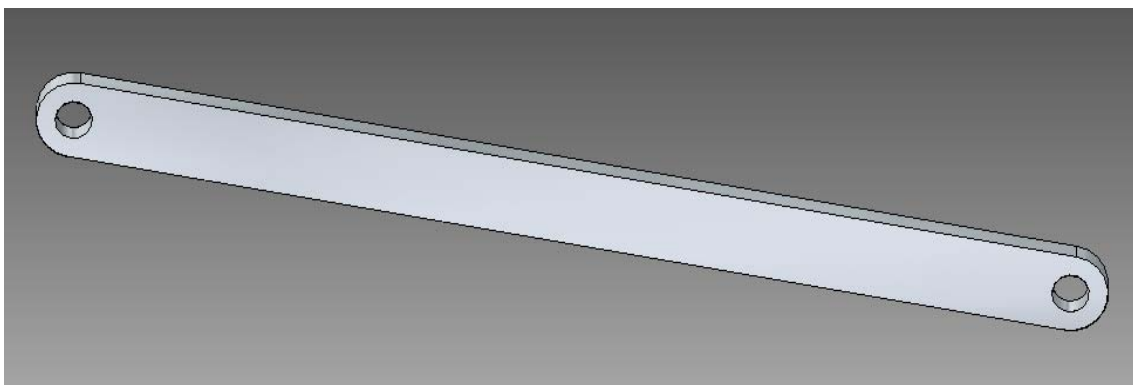


**Figura 4.15:** Fémur

#### **H) Contrafémur:**

El contrafémur realiza la misma función que el fémur pero para el mecanismo de estabilización. En su parte superior conecta con el estabilizador y en su parte inferior conecta con la rodilla y el peroné.

<b><i>Contrafémur</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,151 kg

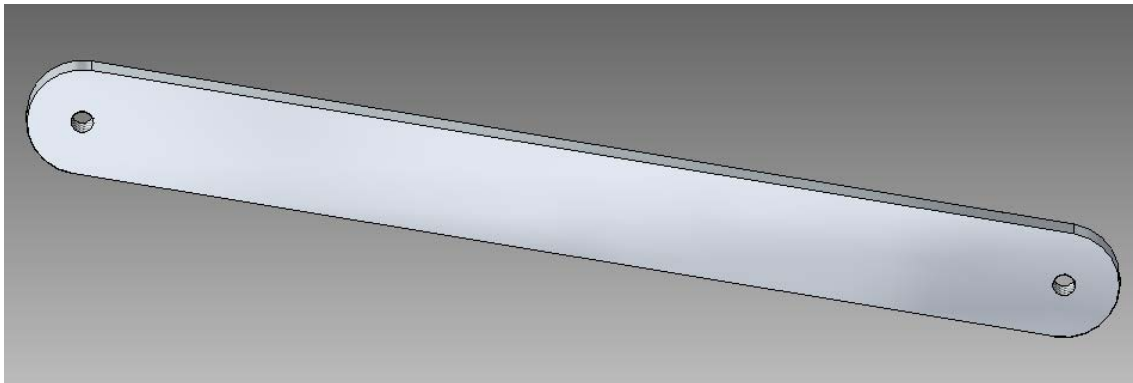


**Figura 4.16:** Contrafémur

### **I) Tendón superior:**

El tendón superior conecta en su parte superior con el punto medio del fémur y en su parte inferior con la cadera y el tendón inferior. Este último punto es el punto de fijo de pivotaje del mecanismo de Pantógrafo, fundamental para realizar la labor de inversión y aumentación de movimiento realizado por el Chebyshev.

<b><i>Tendón superior</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,053 kg



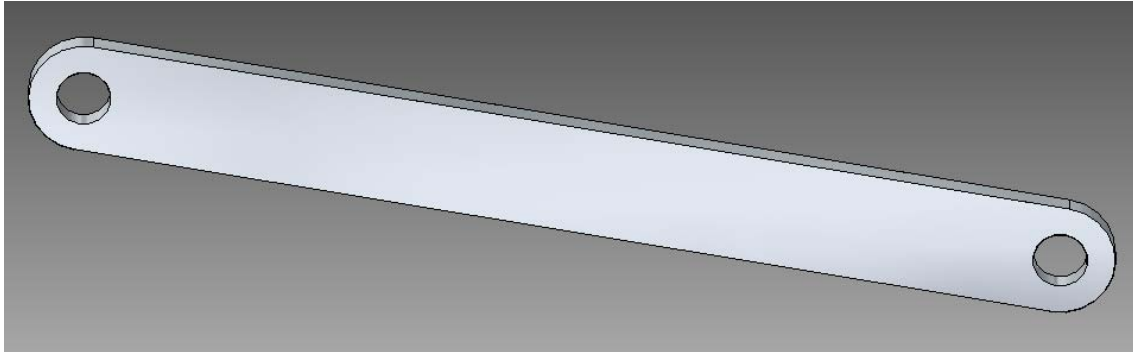
**Figura 4.17:** Tendón superior

### **J) Tendón inferior:**

El tendón inferior conecta en su parte superior con el tendón superior y la cadera (punto de pivotaje), y en su parte inferior con el punto medio de la tibia.

<b><i>Tendón inferior</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>

<i>Masa</i>	0,102 kg
-------------	----------

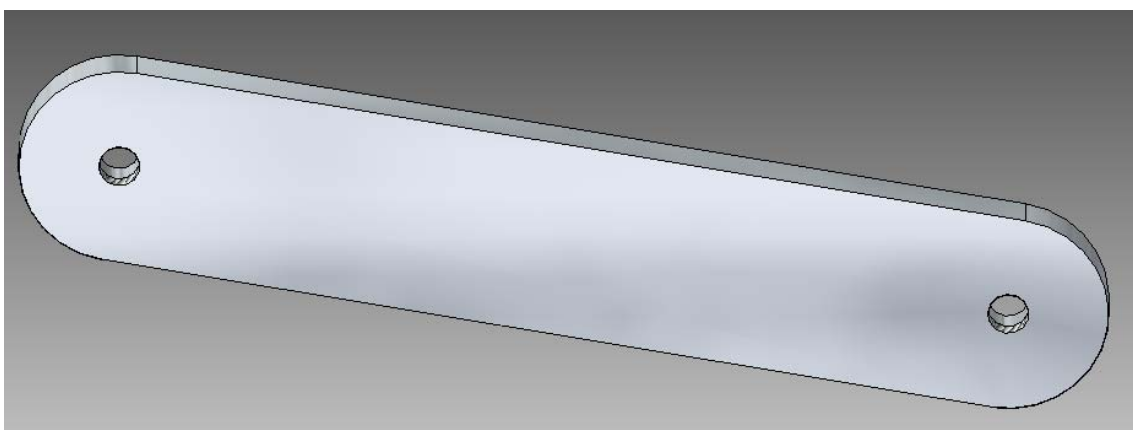


**Figura 4.18:** Tendón inferior

#### **K) Rodilla:**

La rodilla es el nexo de unión entre el fémur y la tibia, y el contrafémur y el peroné. Sirve de soporte físico para la unión del mecanismo de Pantógrafo y el de Estabilizador. Realiza el mismo movimiento que el estabilizador debido a su ubicación dentro del mecanismo.

<b>Rodilla</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,057 kg

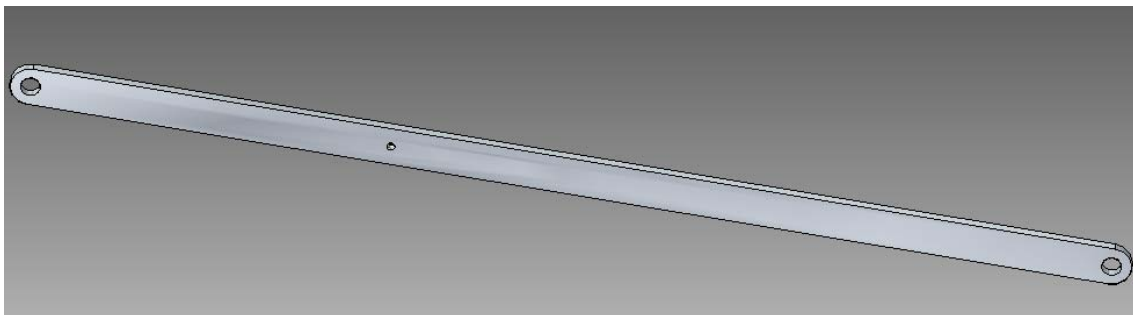


**Figura 4.19: Rodilla**

**L) Tibia:**

La tibia está conectada en su parte superior con la rodilla y el fémur, en su parte central con el tendón inferior y en su parte inferior con el pie (punto de copiado del Pantógrafo). Es el último eslabón del mecanismo de Pantógrafo que realiza la trayectoria aumentada e invertida del Chebyshev.

<b><i>Tibia</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,297 kg



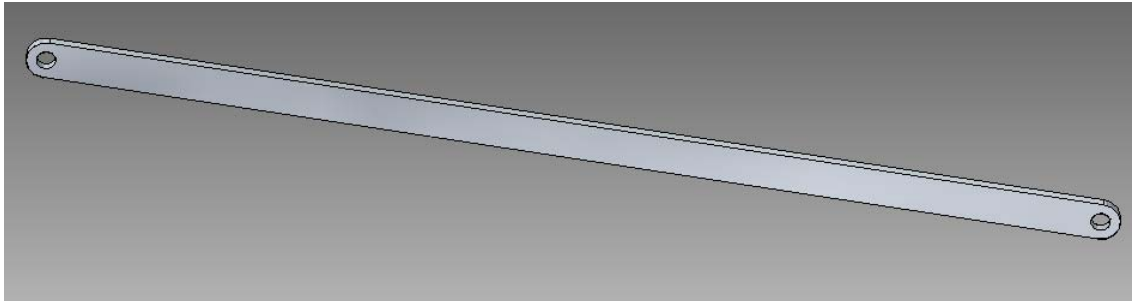
**Figura 4.20: Tibia**

**M) Peroné:**

El peroné realiza la misma función que la tibia pero en el mecanismo de estabilización. En su parte superior conecta con el contrafémur y la rodilla, y en su parte inferior conecta con el pie.

<b><i>Peroné</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351

<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,297 kg

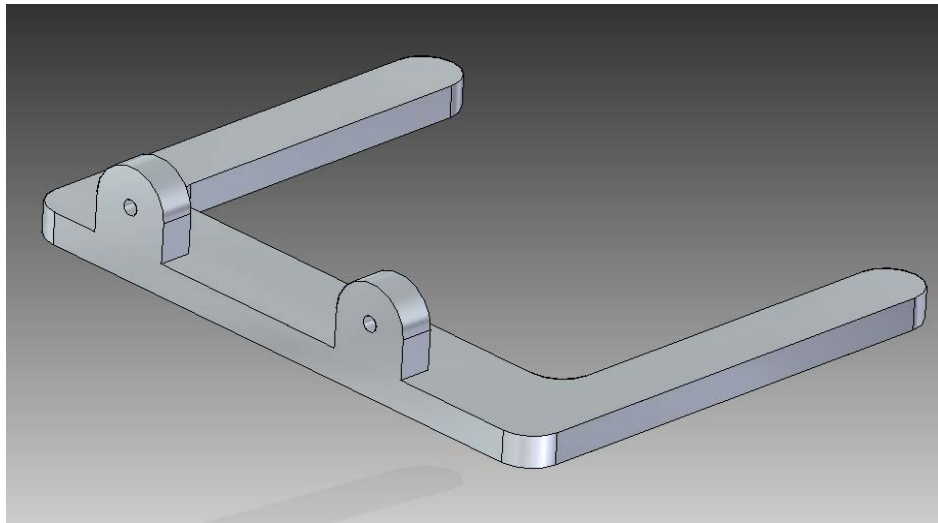


**Figura 4.21:** Peroné

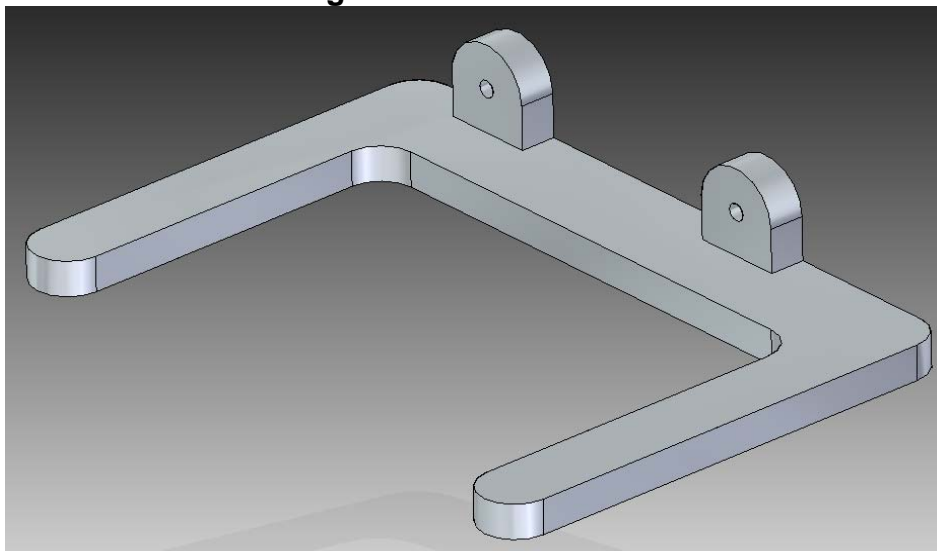
#### **N) Pie:**

El pie es el último elemento de toda la cadena cinemática. Es el responsable del contacto del bípedo con el suelo y por lo tanto de su estabilidad y equilibrio. En el pie terminan tanto el mecanismo de Pantógrafo como el de estabilización. Está unido en sus dos orificios con la tibia y el peroné y describe el movimiento de la rodilla, que a su vez describe el movimiento del estabilizador.

<b><i>Pie</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,308 kg



**Figura 4.22:** Pie derecho

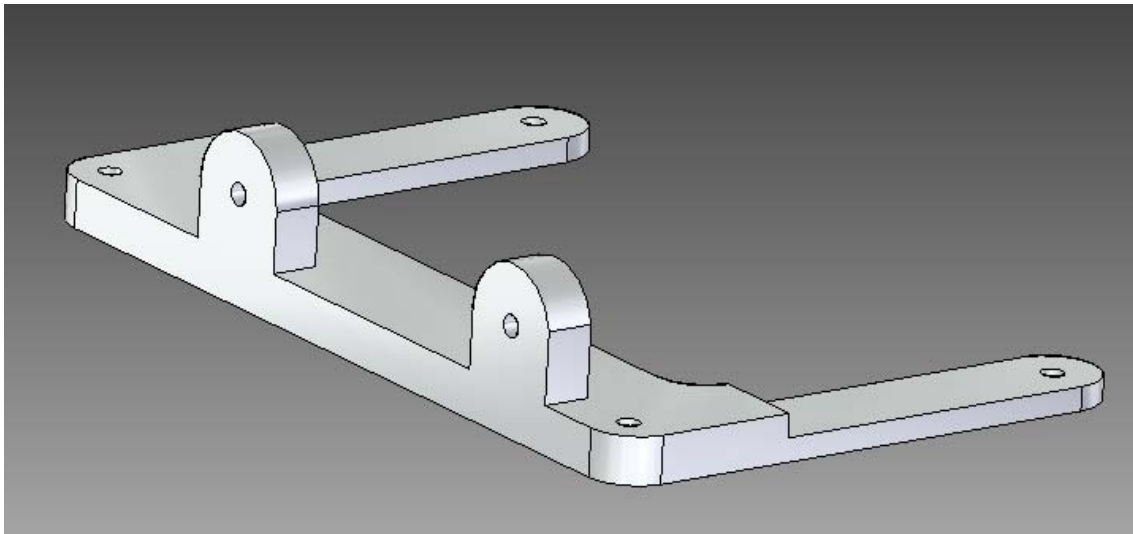


**Figura 4.23:** Pie izquierdo

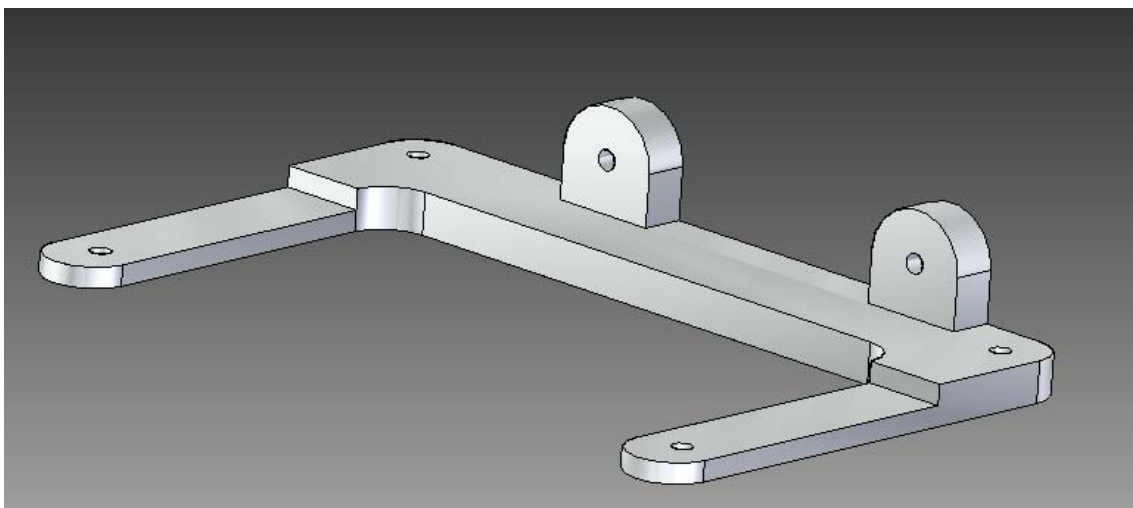
En relación a los pies, se decidió cambiar el diseño de los mismos ya que las holguras existentes entre los pies originales no eran suficientes, y por lo tanto estos acababan chocando entre sí en un instante del ciclo.

<b><i>Pie</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,235 kg





**Figura 4.24: Pie derecho nuevo**



**Figura 4.25: Pie izquierdo nuevo**

## 4.2.2 Elementos de unión y sujeción

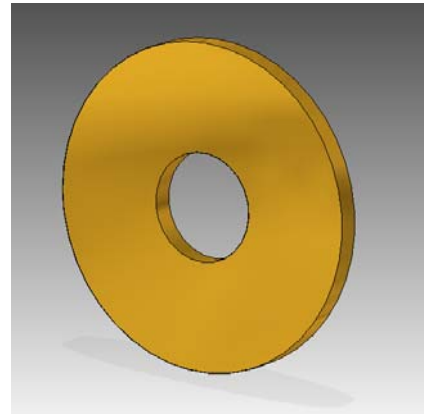
Los elementos de unión son todas aquellas piezas necesarias para la fijación de los distintos componentes entre sí.

A continuación se exponen los distintos tipos de elementos de unión utilizados:

### **A) Arandelas:**

Las arandelas se sitúan entre eslabones para mejorar las fijaciones en las articulaciones asegurando una adecuada rigidez entre las mismas.

<b>Arandela</b>	
<i>Material</i>	Latón
<i>Densidad</i>	8.470 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,001 kg

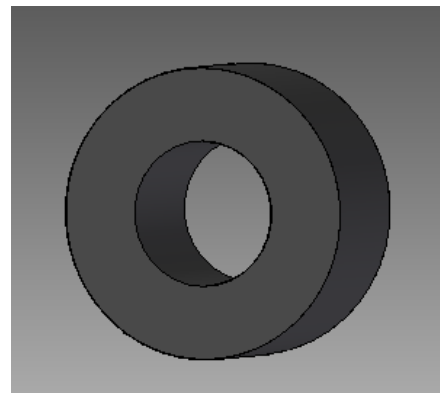


**Figura 4.26:** Arandela

### **B) Rodamientos:**

Los rodamientos se sitúan en las articulaciones de los eslabones para disminuir la fricción entre ellos.

<b>Rodamiento</b>	
<i>Material</i>	Acero
<i>Densidad</i>	7.833 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,002 kg

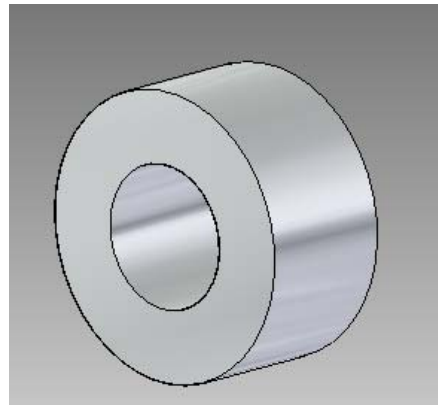


**Figura 4.27:** Rodamiento

### **C) Separadores:**

Los separadores se colocan junto con los eslabones en sus puntos de articulación para evitar la interferencia entre los elementos que están a distintas distancias de la cadera y permitir que realicen de forma correcta su movimiento.

<b>Rodamiento</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,006 kg

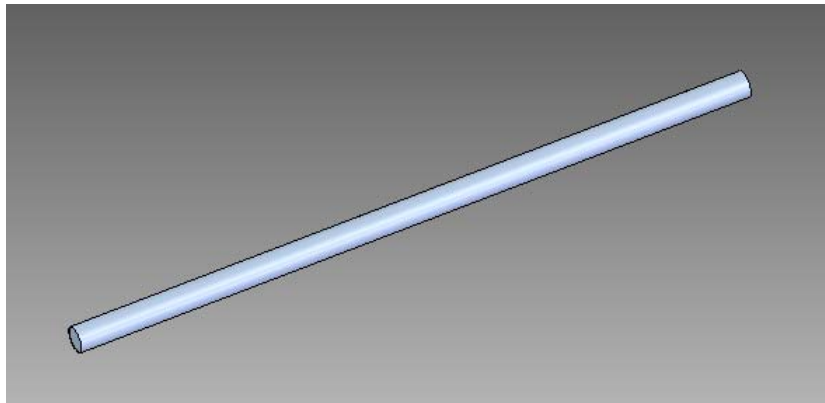


**Figura 4.28:** Separador

#### **D) Ejes roscados:**

Los ejes roscados se emplean como soporte físico del motor y del engranaje primario. Están apoyados por ambos lados en las caderas interiores derecha e izquierda. También se emplean para unir, distanciar y mantener siempre paralelas ambas caderas. Además dotan al conjunto de una mayor rigidez a torsión.

<b>Ejes roscados</b>	
<i>Material</i>	Acero
<i>Densidad</i>	7.833 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,021 kg



**Figura 4.29:** Ejes roscados

**E) Ejes de Cadera:**

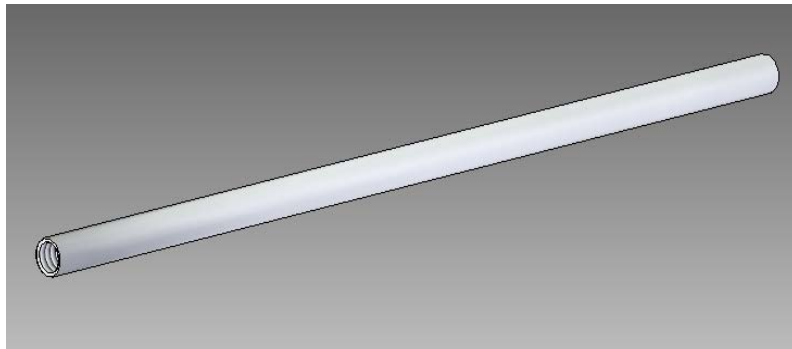
Los ejes de cadera se emplean para unir, distanciar y mantener siempre paralelas ambas caderas. Dotan al conjunto de una elevada rigidez a torsión.

<b><i>Ejes de Cadera</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,028 kg

<b><i>Ejes de Cadera 2</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,006 kg



**Figura 4.30:** Ejes de Cadera

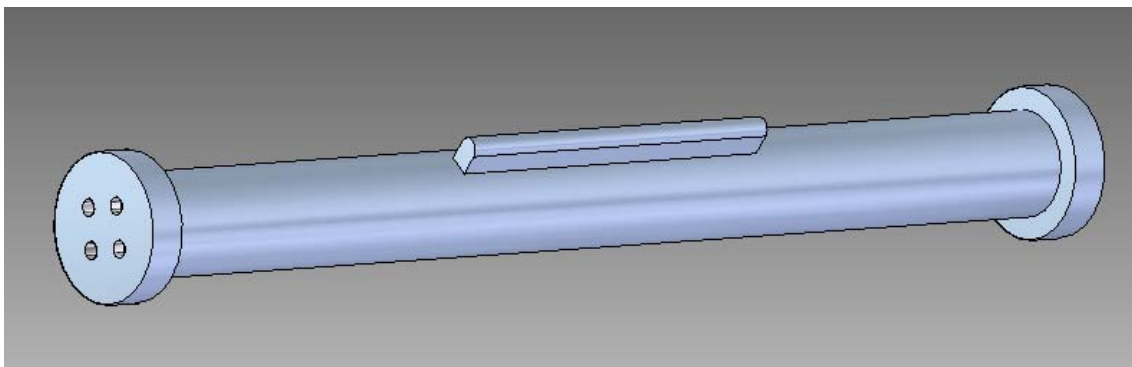


**Figura 4.31:** Ejes de Cadera 2

**F) Eje principal:**

El eje principal sirve de soporte físico al engranaje principal, que es el encargado de transmitir el movimiento de rotación a la manivela de mecanismo de Chebyshev. Además también sirve para fijar las dos caderas entre sí de forma segura, ya que se trata de un eje con refuerzos atornillados a ambos lados de las caderas.

<b><i>Eje principal</i></b>	
<i>Material</i>	Acero
<i>Densidad</i>	7.833 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,204 kg

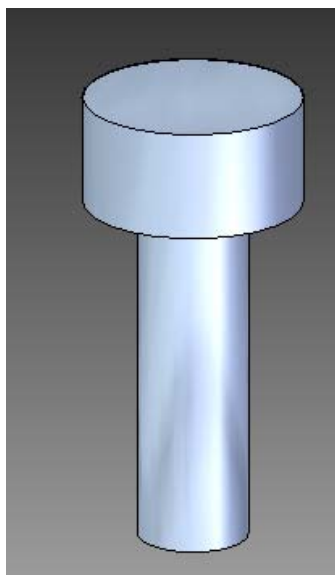


**Figura 4.32:** Eje principal

**G) Tornillos:**

Los tornillos se emplean para fijar los eslabones entre sí en sus articulaciones. Los distintos tipos de tornillos utilizados son de métrica 5 y de diferentes longitudes:

<b>Tornillería</b>				
<i>Tipo</i>	<b>M5 x 16</b>	<b>M5 x 21</b>	<b>M5 x 27</b>	<b>M5 x 38</b>
<i>Material</i>	Acero	Acero	Acero	Acero
<i>Densidad</i>	7.833 kg/m <sup>3</sup>	7.833 kg/m <sup>3</sup>	7.833 kg/m <sup>3</sup>	7.833 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,006 kg	0,006 kg	0,007 kg	0,007 kg



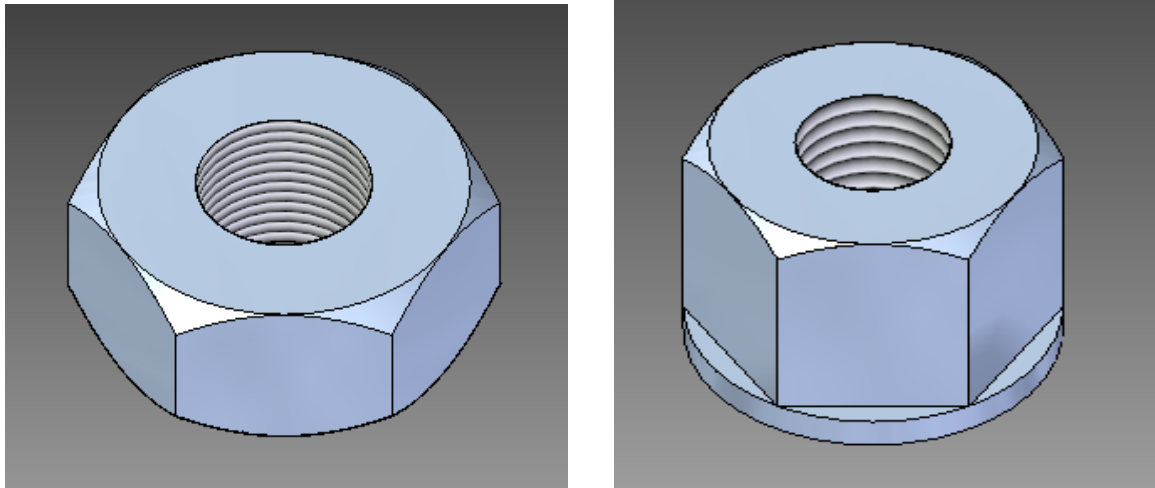
**Figura 4.33:** Tornillo M5

#### **H) Tuercas:**

Las tuercas se utilizan para fijar el motor a los ejes roscados para aumentar su sujeción y disminuir así sus vibraciones que pueden resultar perjudiciales para el funcionamiento del conjunto. Las tuercas utilizadas son de métrica 5.

<b>Tuercas</b>		
<i>Tipo</i>	<b>Sin base</b>	<b>Con base</b>
<i>Material</i>	Acero	Acero

<i>Densidad</i>	7.833 kg/m <sup>3</sup>	7.833 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,002 kg	0,003 kg



**Figura 4.34:** Tuercas M5

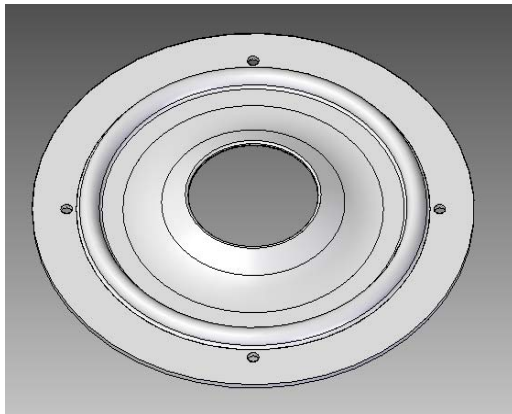
### 4.2.3 Elementos motrices y sistema de transmisión

Los elementos motrices son todos aquellos componentes que hacen posible el movimiento del robot, desde el motor con su movimiento giratorio hasta la transmisión del mismo a través de las ruedas dentadas y correas hasta la manivela.

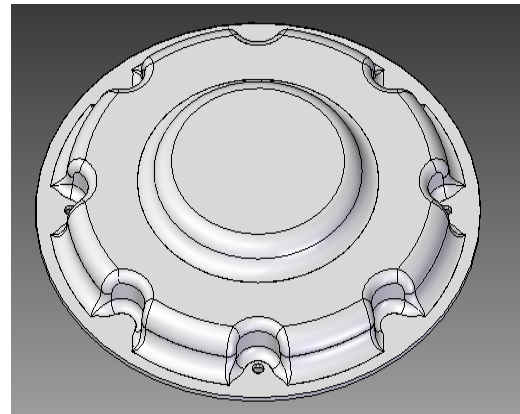
#### **A) Motor:**

El motor transforma la energía eléctrica que se le suministra en energía mecánica de movimiento de rotación en su eje de salida.

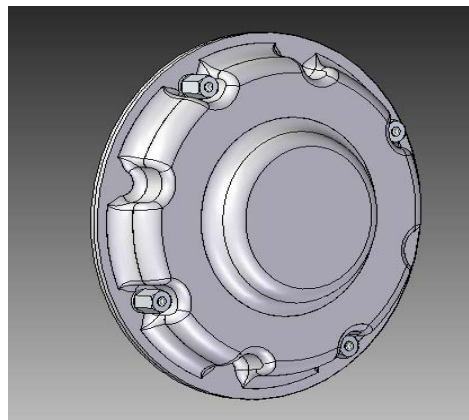
Se trató de realizar una modelización lo más fielmente posible para que los resultados obtenidos también fueran lo más realistas posibles.



**Figura 4.35-1: Pieza motor 1**



**Figura 4.35-2: Pieza motor 2**

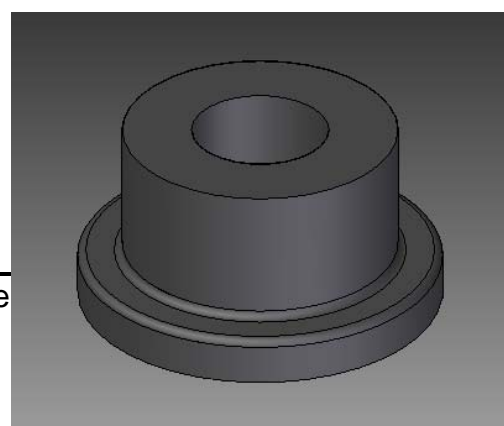


**Figura 4.35: Motor**

**B) Enganche motor - Eje primario:**

Este enganche sirve para realizar una buena fijación entre el motor y el eje primario sobre el cual se aloja la rueda dentada primaria que recibe el movimiento directo del motor y lo distribuye hacia la manivela.

<b>Enganche motor - eje</b>	
<b>Material</b>	Acero





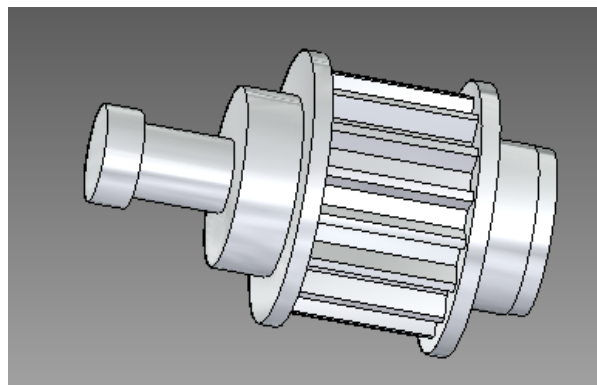
<i>Densidad</i>	7.833 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,101 kg

**Figura 4.36:** Enganche motor - Eje primario

**C) Rueda dentada primaria (piñón):**

La rueda dentada primaria (piñón) recibe el movimiento de rotación directamente del motor. A través de ella se empieza la distribución del mismo para llevarlo hacia arriba hasta el lugar en donde está alojada la manivela.

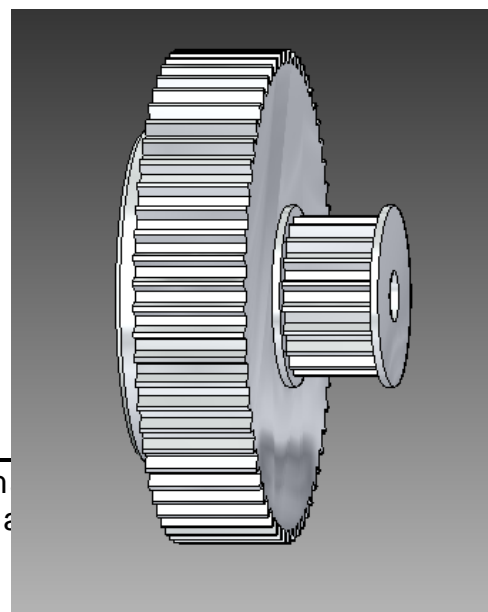
<b><i>Rueda dentada primaria</i></b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,032 kg



**Figura 4.37:** Rueda dentada primaria

**D) Conjunto secundario:**

El conjunto secundario recibe el movimiento del piñón primario a través de la correa en la rueda dentada. Es el escalón intermedio entre el motor y el eje final en el cual se encuentra la manivela.



A través de su piñón engancha con la rueda dentada principal.

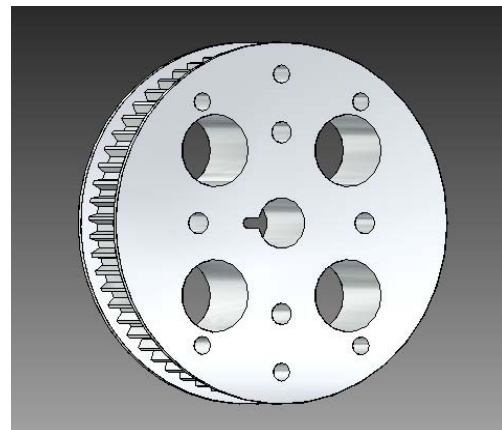
<b>Conjunto secundario</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,458 kg

**Figura 4.38:** Conjunto secundario

**E) Rueda dentada principal:**

La rueda dentada principal es final de la cadena cinemática. Recibe el movimiento del piñón secundario a través de la correa y lo transmite a través del eje principal finalmente a la manivela.

<b>Rueda dentada principal</b>	
<i>Material</i>	Al 2024-T351
<i>Densidad</i>	2.712 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,337 kg



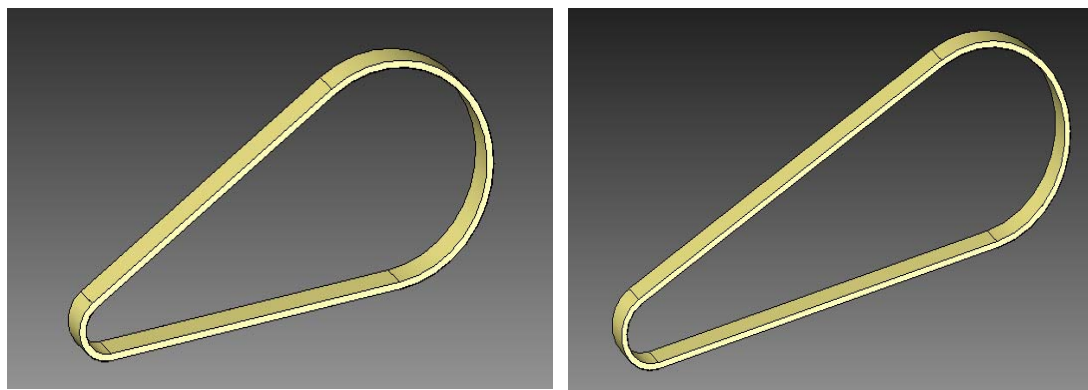
**Figura 4.39:** Rueda dentada principal

**F) Correas:**

Las correas son las encargadas de transmitir el movimiento entre las ruedas dentadas. Además son las responsables de que se pueda ir subiendo de una manera rápida la transmisión hasta la ubicación de la manivela.

Se han utilizado dos correas de dimensiones diferentes, (las dimensiones se pueden observar en los planos anexos al final del documento):

<b>Correas</b>		
	<b>Correa 1</b>	<b>Correa 2</b>
<i>Material</i>	Nailon	Nailon
<i>Densidad</i>	1.220 kg/m <sup>3</sup>	1.220 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa</i>	0,026 kg	0,033 kg



**Figura 4.40:** Correas 1 y 2

### 4.3 MONTAJE DEL CONJUNTO

Una vez que hemos modelado todas las piezas del conjunto ya solo falta montarlas y ensamblarlas unas con otras. Para ello se utilizará la aplicación de conjunto del programa *Solid Edge ST*, al igual que para el modelado de las

piezas. Después del montaje de las piezas se necesita asegurar el correcto funcionamiento del conjunto completo, para evitar que se produzcan interferencias entre las piezas.

Para el montaje de las piezas se utilizan las relaciones asociativas que se exponen a continuación:



**Hacer coincidir:**

Mediante esta aplicación se garantiza que una cara plana de la pieza entrante sea coincidente con la cara plana de otra pieza ya existente, manteniendo el paralelismo entre ellas.



**Alinear caras:**

Garantiza que una cara plana de la pieza entrante sea coincidente con la cara plana de una pieza ya existente, de forma que sus normales tengan el mismo sentido, manteniendo el paralelismo entre ambas caras.



**Alineación axial:**

Garantiza que una superficie cilíndrica de la pieza entrante sea coaxial con otra de la pieza existente.



**Insertar:**

Se trata de una aplicación que combina las aplicaciones de *Hacer coincidir* y *Alineación axial* que inmoviliza la pieza entrante. No se logra el

mismo efecto que al aplicar ambas relaciones por separado, ya que en ese caso se permitiría el giro de la pieza, mientras que con la relación *Insertar* la pieza queda totalmente fija. Una aplicación característica de este tipo de relaciones es la de colocación de tornillos o piezas de fijación similares.



#### **Conectar:**

Garantiza la coincidencia entre un punto significativo de la pieza entrante y otro punto, línea o cara de la pieza existente. Se suele utilizar solo cuando una pieza no puede colocarse correctamente mediante relaciones de coincidencia y alineación.



#### **Paralelo:**

Garantiza que una línea o eje cilíndrico de la pieza entrante sea paralela a (o coincidente con) una línea o eje cilíndrico de una pieza existente.



#### **Ángulo:**

Establece el ángulo entre un elemento de la pieza entrante (línea o cara plana) y otro de una pieza existente.



#### **Tangente:**

Garantiza que una superficie de la pieza entrante sea tangente a otra de una pieza existente.



#### **Leva:**

Garantiza el contacto entre un bucle cerrado de superficies tangentes de una pieza (*leva*) y una superficie única (esfera, cilindro, plano o punto) de la otra pieza (*seguidor*).

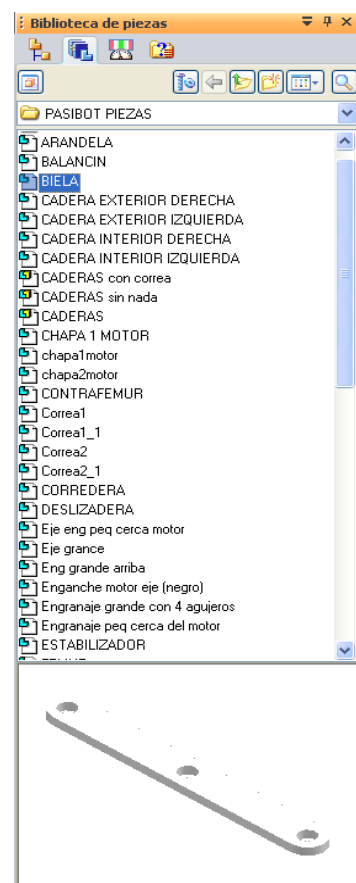


### **Coincidir sistemas de coordenadas:**

Coloca la pieza entrante de forma que su sistema de coordenadas coincida con el de una de las piezas existentes.

Una vez que ya conocemos las relaciones asociativas que se pueden dar entre las piezas, se procede a juntar las piezas y establecer dichas relaciones entre las mismas.

Para ello se utiliza la aplicación *Biblioteca de piezas*, mediante la cual se seleccionan las piezas que se quieren ir incorporando al conjunto, a través del directorio donde se encuentra la pieza, siendo aconsejable que todas las piezas se encuentren en el mismo directorio. Una vez que se selecciona la pieza se arrastra con el botón izquierdo del ratón hasta la ventana gráfica donde se quiere realizar el ensamblaje del conjunto. La primera pieza que se inserta queda anclada y sirve de base para la colocación de las demás.



**Figura 4.41:** Biblioteca de piezas

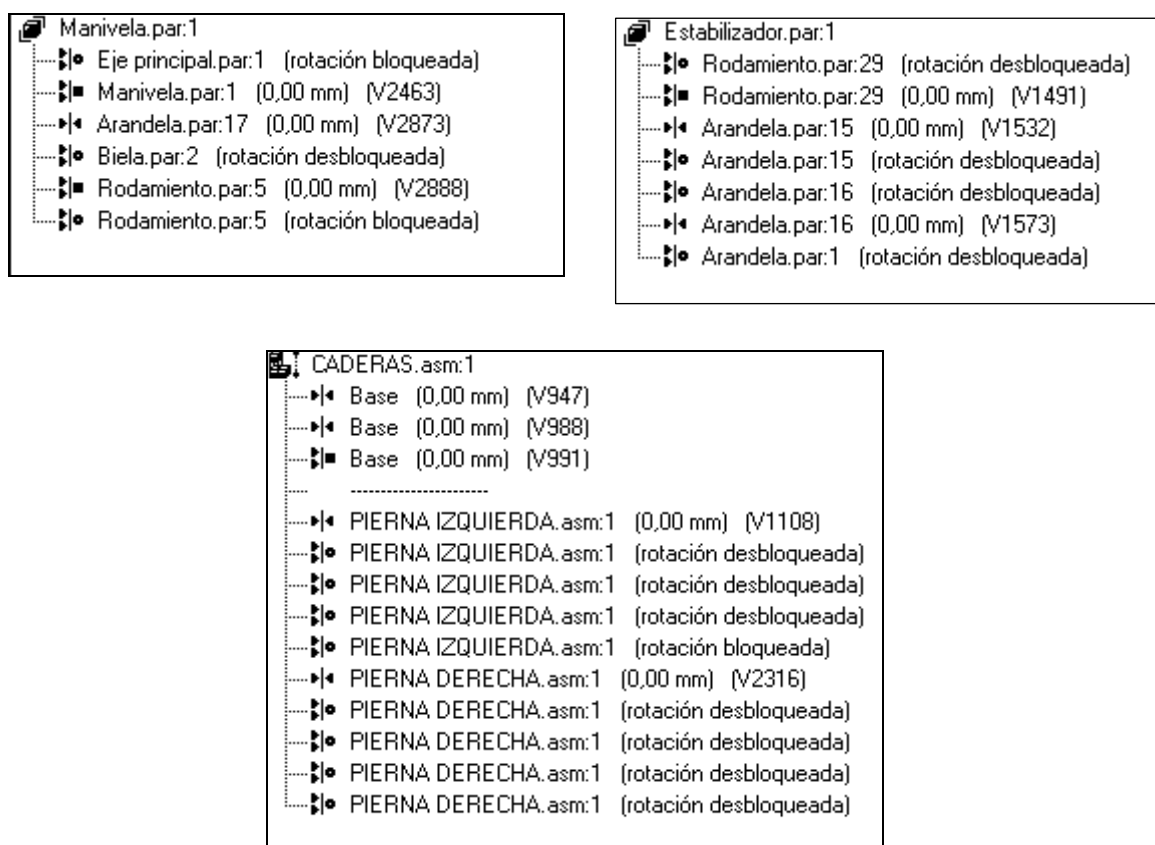
El montaje del Pasibot se ha dividido en 3 subconjuntos para facilitar la adición de relaciones entre piezas debido al gran número de piezas que están presentes en el conjunto.

Los subconjuntos en los que se ha dividido el conjunto completo son:

pierna derecha, pierna izquierda y caderas. Cuando se tienen montados los subconjuntos por separado, se ensamblan ambas piernas a las caderas y ya tenemos el robot completamente montado.

De todas las relaciones asociativas existentes, las que únicamente se han empleado son las más comunes: coincidir, alineación axial, insertar y alineación plana.

A continuación se muestran algunos ejemplos de relaciones existentes en las piezas y la unión de los subconjuntos (ambas piernas) a la cadera:



**Figura 4.42:** Relaciones asociativas

La información que aparece por encima de la línea de puntos indica las relaciones de la pieza como entrante, mientras que las que hay por debajo indican sus relaciones como existente (con otras piezas).

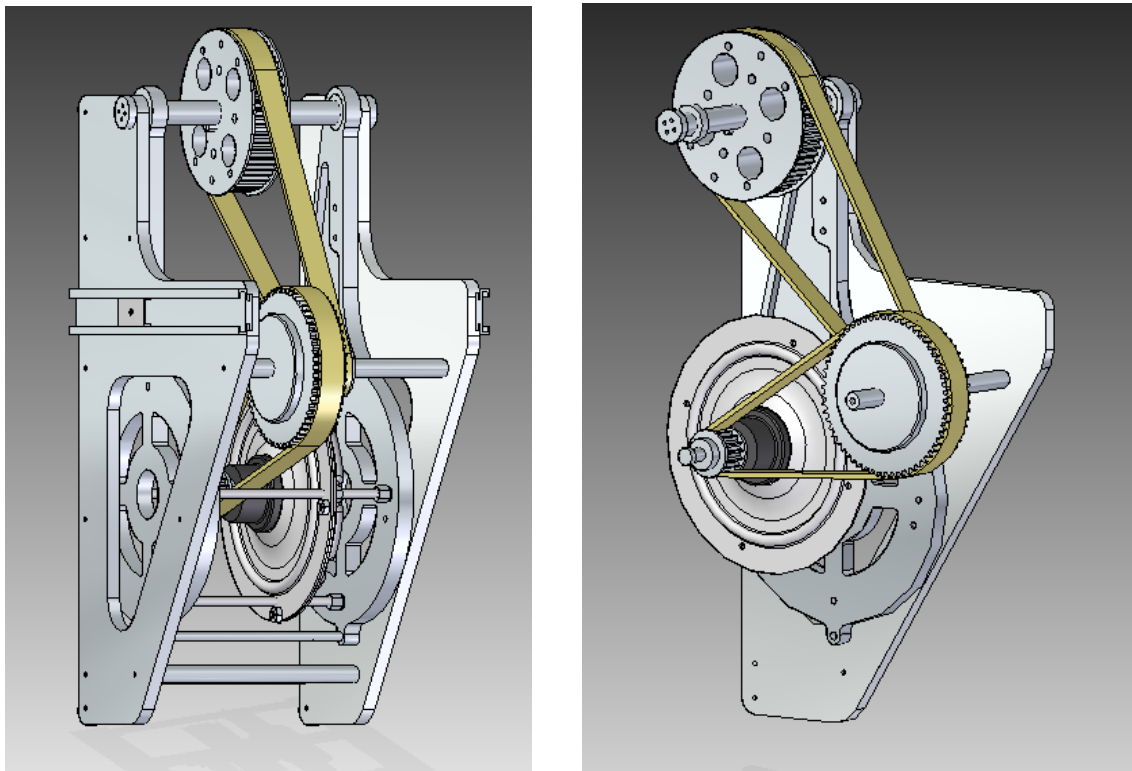
En los *Anexos* de este Proyecto se pueden consultar las relaciones asociativas de todas las piezas que componen el conjunto.

Una vez que tenemos todas las piezas y subconjuntos ensamblados correctamente se ha finalizado el proceso de montaje. A continuación se puede observar el diseño final del modelo en sus diferentes subconjuntos y el conjunto total:

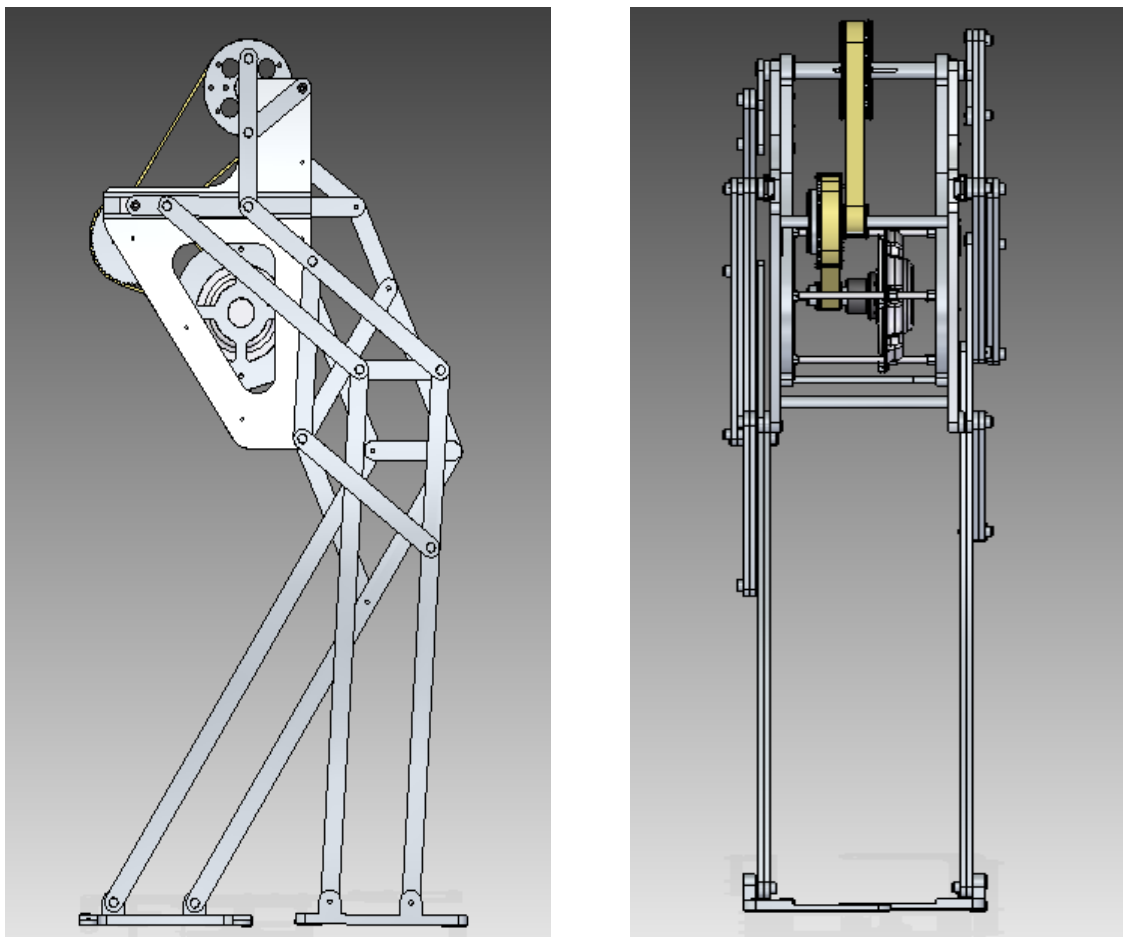


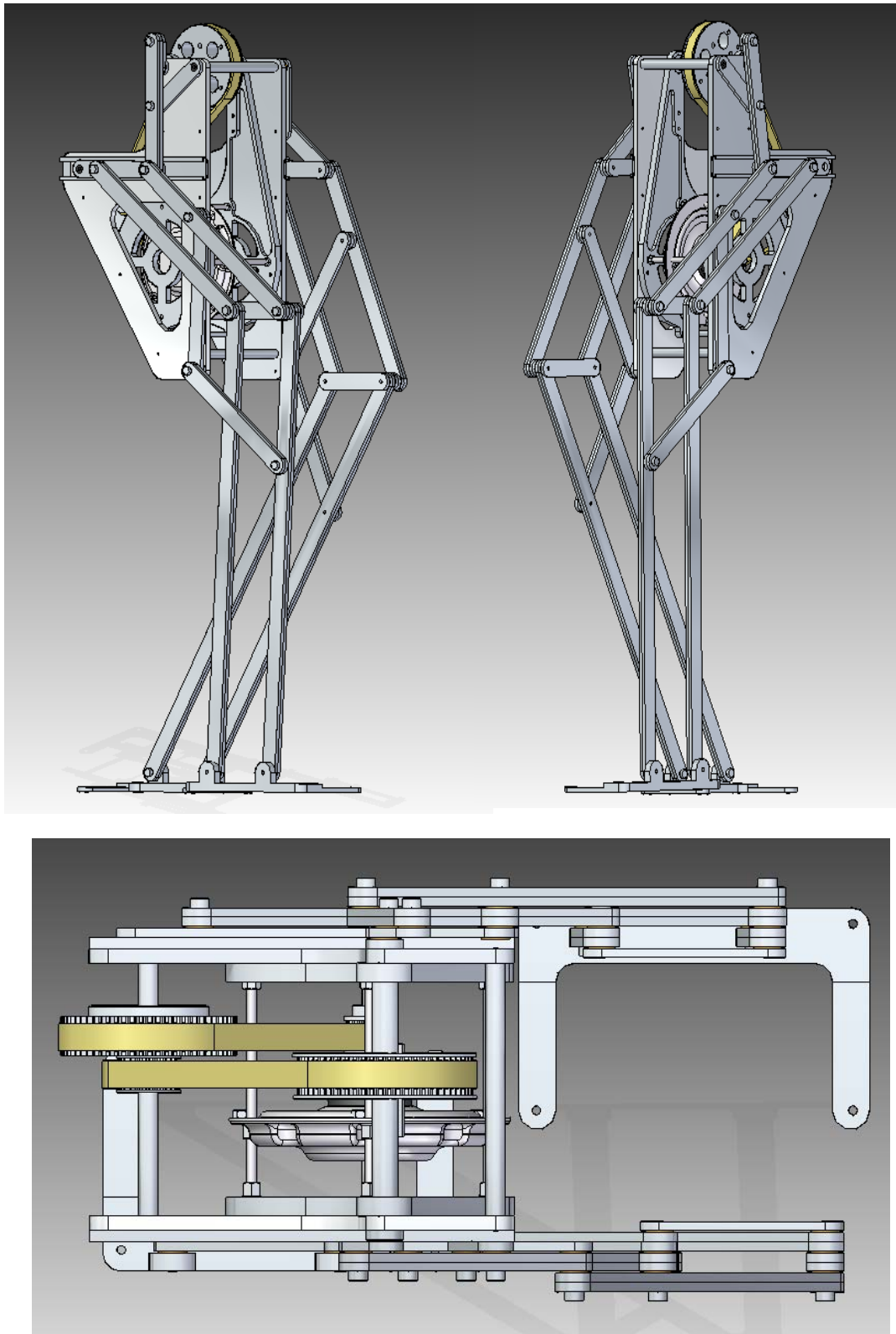
**Figura 4.43:** Pierna derecha y pierna izquierda





**Figura 4.44:** Caderas y sistema de transmisión





**Figura 4.45:** Pasibot completo

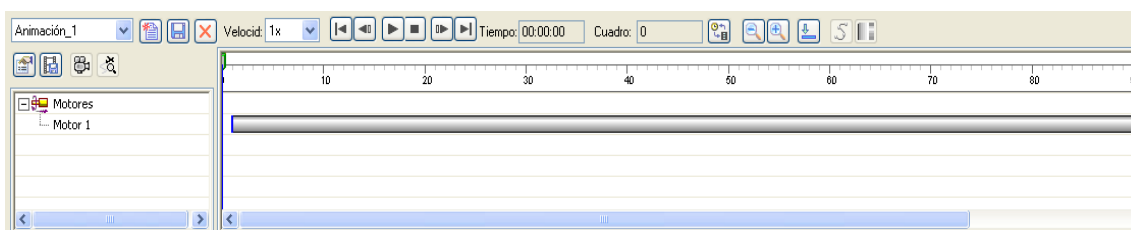
El peso total del Pasibot es de **11,064 kg**, incluido todo el sistema motriz y de transmisión.

## 4.4 SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS

Una vez que tenemos todo el conjunto montado, sólo falta comprobar que no existen interferencias entre los elementos que lo componen.

Para ello utilizaremos el *Entorno Motion*, en el cual simularemos un motor actuando en el conjunto. Se debe comprobar que durante la simulación del movimiento no exista ninguna interferencia entre los elementos y que todas las articulaciones entre piezas se mantengan estables.

Una vez que se ha introducido el motor, se debe utilizar la aplicación *Simular Motor*, en la cual se pueden modificar los parámetros del motor, cambiar la trayectoria de la cámara, grabar un formato .avi, etc.



**Figura 4.46:** Simulación de motor

Una vez que hemos realizado la simulación con el software de *Solid Edge ST*, y no se ha detectado ninguna anomalía, se procede a realizar un estudio más amplio mediante el programa *MSC. ADAMS* de la dinámica del Pasibot.



## Capítulo V:

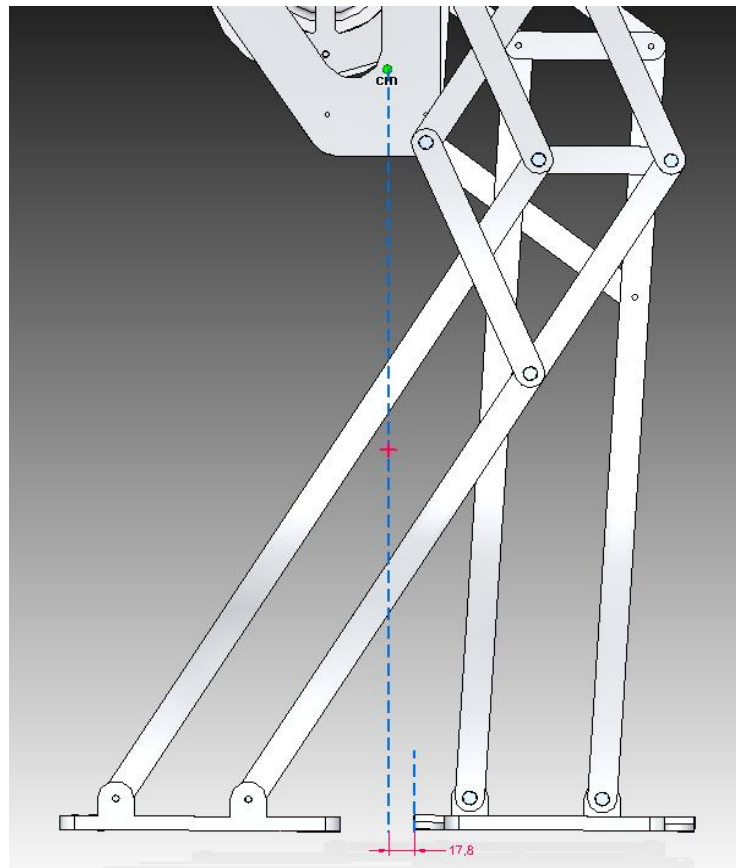
# *ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD EN ADAMS Y DISEÑO DEL NUEVO ESTABILIZADOR*

## 5.1 ESTUDIO DE FUNCIONALIDAD DEL PASIBOT EN ADAMS

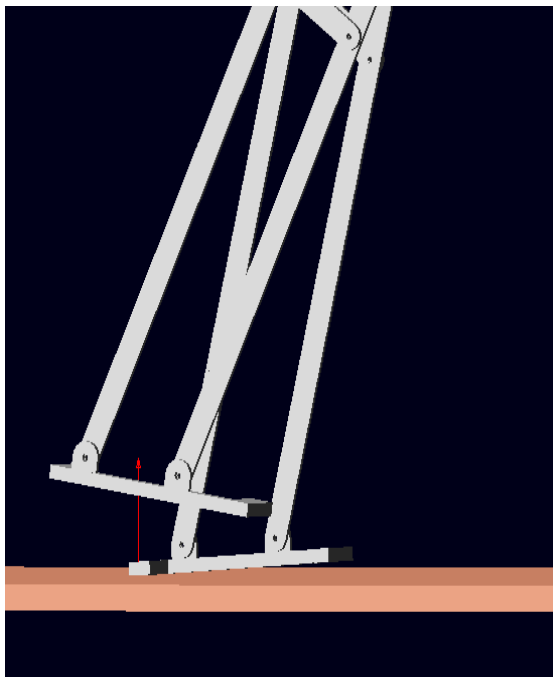
Se hizo un segundo estudio del modelo de pasibot *original* en Adams. Después de varios ensayos se observó que el robot no conseguía caminar recto y que avanzados unos pasos, acababa perdiendo la estabilidad y caía al suelo. Se dedujeron algunas de las causas por las cuales se podía producir este fenómeno. Las más importantes son las siguientes:

La primera de las razones de que acabase perdiendo el equilibrio, era la mala posición del **centro de gravedad**. En primer lugar a la hora de levantar el pie trasero para efectuar el paso, debido a una mala posición del centro de gravedad del robot, éste acababa inclinándose hacia arriba quedando solo en contacto con el talón de su pie de apoyo, lo que producía el desequilibrio del mismo y su posterior desviación respecto de la trayectoria a seguir. Este fenómeno se puede apreciar en la imagen adjunta abajo, en la cual vemos como el centro de gravedad del robot está retrasado respecto a la posición del pie que permanecerá apoyado en el suelo mientras el pie posterior inicia el paso. Como se explicó anteriormente este hecho provoca que el robot tienda a desplazarse hacia atrás debido al momento de vuelco que genera la mala posición del centro de gravedad unido a la pérdida de equilibrio del bípedo al no tener los dos pies apoyados en el suelo.

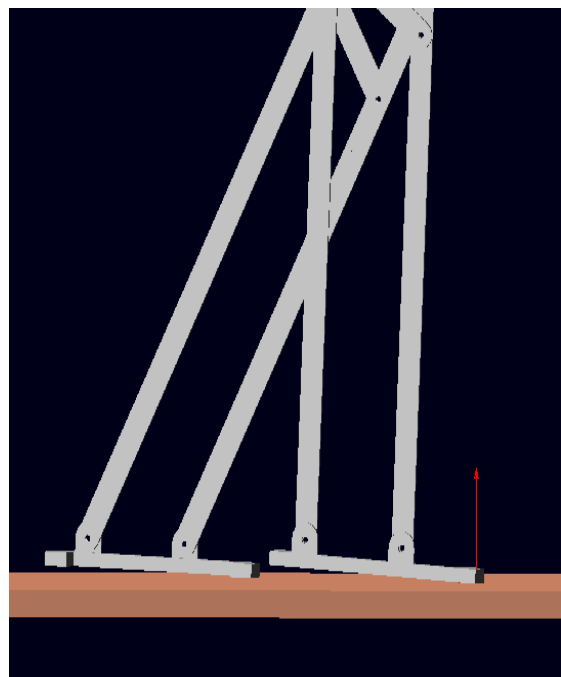
De la misma manera, en la segunda etapa del paso, cuando el bípedo se encontraba apoyado en un solo pie y el opuesto se encontraba en posición adelantada, acababa perdiendo la estabilidad antes de apoyar el pie delantero, haciendo que el pie de apoyo se levantase ligeramente por la zona del talón. Esto suponía que en el momento del contacto con el suelo, el pie adelantado entrase inclinado en lugar de apoyar completamente su superficie. Este fenómeno se aprecia en la segunda imagen, en la que el centro de gravedad ligeramente adelantado provoca que tiende a volcarse hacia delante.



**Figura 5.1:** c.d.g del modelo original



**Figura 5.2:** Pie pivotando en el talón al inicio del paso



**Figura 5.3:** Pie pivotando en la punta al inicio del paso



Otro factor muy importante a tener en cuenta, es el hecho de que la trayectoria de la planta del pie tampoco ayuda a mantener la estabilidad del robot, ya que a la hora de entrar en contacto con el suelo, lo primero que apoya es el pico delantero en lugar de toda la superficie. Esto es debido a que el “**estabilizador**” del robot no sigue una trayectoria paralela al suelo, sino que se inclina un poco hacia delante en su movimiento de giro transmitido por el mecanismo de *Chebyshev*, inclinando a su vez el pie hacia delante.

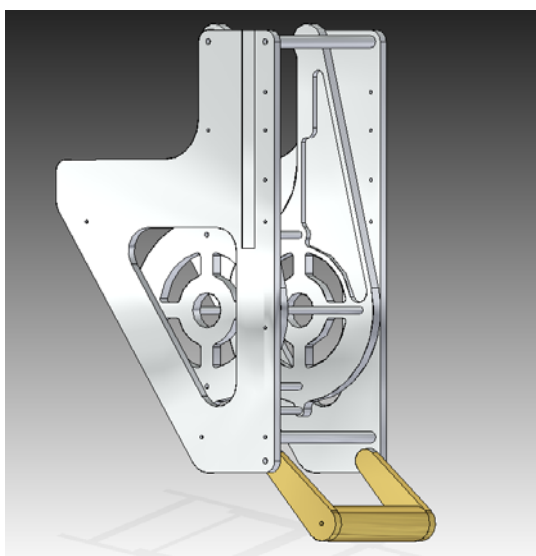
Este fenómeno provoca que las dos superficies de los pies no estén en contacto completo con el suelo durante el apoyo, produciendo una menor superficie de contacto, lo que se traduce como un menor agarre para combatir las fuerzas de inercia y menor estabilidad para contrarrestar el peso del robot, favoreciendo el hecho de que el bípedo pivotase sobre si mismo impidiendo que se mantuviera estable y que siguiera una trayectoria recta.

Estos resultados nos conducen a llevar a cabo modificaciones que mejoren el comportamiento del robot bípedo. Se efectuarán modificaciones en el **estabilizador** para conseguir que los pies entren completamente horizontales y paralelos al suelo, y también se propondrá una mejora en el diseño de las *Caderas* y todo el *Sistema de Transmisión* para conseguir una posición del **centro de gravedad** que permita caminar de manera estable al robot.

## 5.2 MODIFICACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PASIBOT

Una vez detectada una mala posición del centro de gravedad en el modelo original del pasibot y que este hecho repercutía en la estabilidad del mismo, se ha realizado un estudio para una nueva orientación del centro de gravedad.

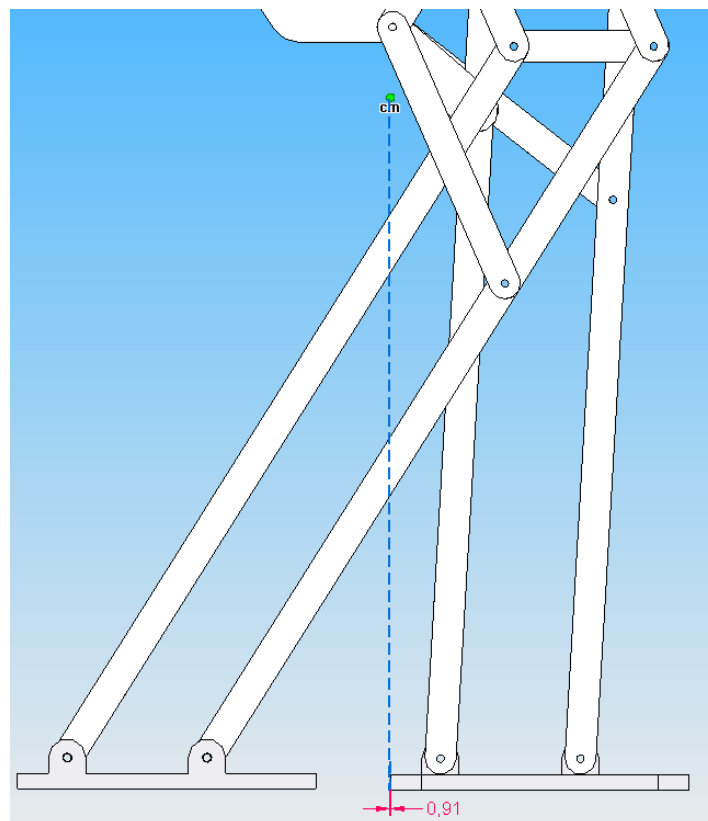
Para realizar esta corrección y hallar cual es la posición ideal del centro de gravedad que permita caminar al pasibot de manera estable sin que pierda el equilibrio, nos hemos ayudado del programa *Solid Edge ST* en primer lugar para realizar una modificación en la cadera colocando un “contrapeso” que nos permita recolocar el centro de gravedad del bípedo, hasta lograr la posición correcta del mismo. Para saber cual es la posición ideal, nos hemos ayudado del programa *MSC. Adams*, en el cual hemos simulado la dinámica de movimientos del robot observando su mayor o menor estabilidad, a medida que se recolocaba el centro de gravedad. Para modificar el centro de gravedad, se ha ido variando la densidad del contrapeso, que repercute directamente en su masa, lo que modifica el centro de masas del robot. El contrapeso es un cilindro de dimensiones: base de 30mm de diámetro y longitud 121mm, lo que hacen un volumen de  $85.529,9\text{mm}^3$ . Esta acoplado a las caderas.



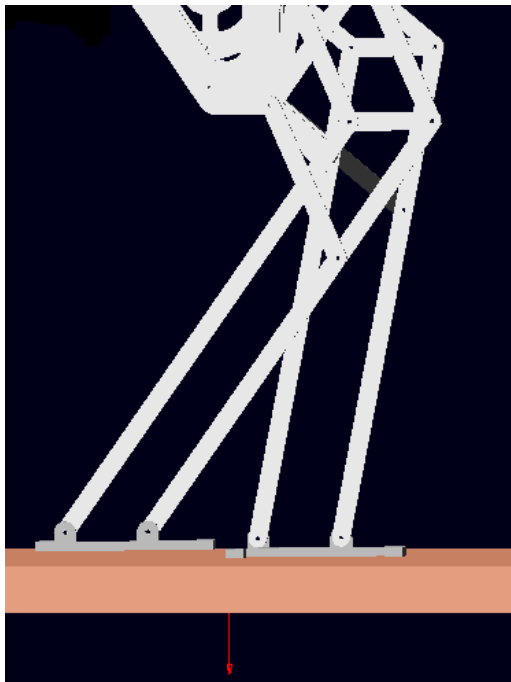
**Figura 5.4:** Contrapeso



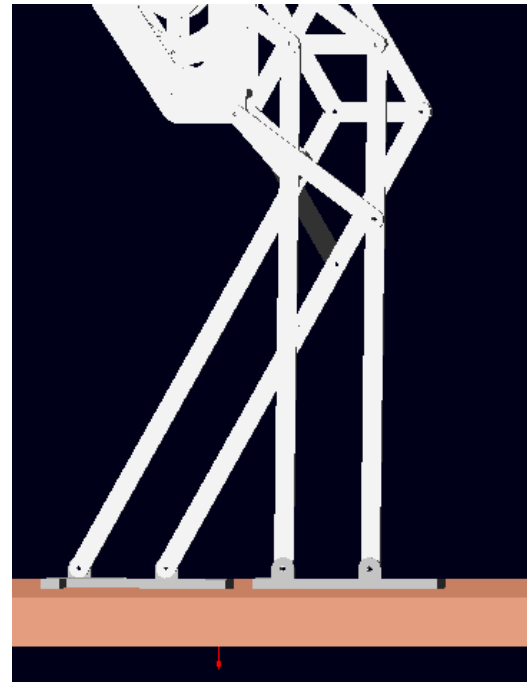
Tras varias modificaciones en la ubicación del centro de gravedad, se encontró el lugar idóneo en el cual el bípedo camina correctamente sin desequilibrarse. Este correspondía a una masa de **3kg**, para una densidad de  $35.075 \text{ kg/m}^3$ . En estas condiciones el centro de gravedad queda ubicado de la siguiente manera (ver imagen inferior). Se puede observar como el centro de gravedad ha bajado su posición y se ha adelantado respecto a la imagen anterior sin contrapeso. Este hecho repercute de forma beneficiosa en el caminar del bípedo, ya que favorece que el momento de vuelco que se creaba anteriormente que hacia volcar hacia atrás al robot, se vea reducido y no se desequilibre. En las dos últimas imágenes se observa como también influye en la entrada del pie, ya que lo hace mucho menos picado que en el caso anterior, lo que corrobora el efecto de mejora que se consigue.



**Figura 5.5:** c.d.g del modelo modificado



**Figura 5.6:** Pie al inicio del paso



**Figura 5.7:** Pie al final del paso

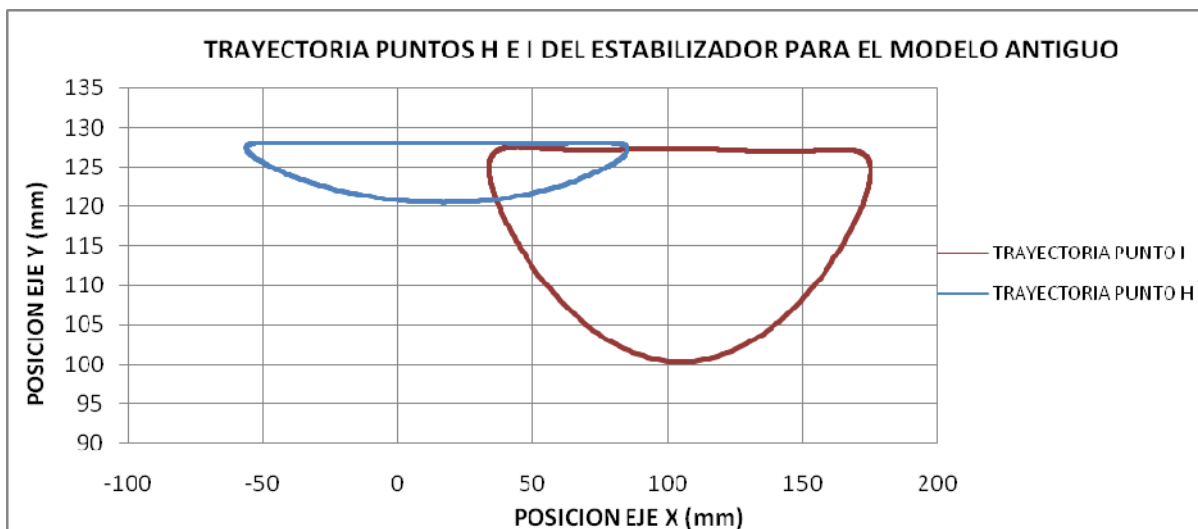
En estas dos últimas imágenes, también se había realizado ya la modificación del estabilizador y la corredera en “T” que se explican a continuación. Por lo tanto estas imágenes son el resultado de ambas mejoras combinadas.

En ellas se observa que debido a la nueva ubicación del centro de gravedad, la intensidad de la pisada (representada por las flechas rojas) ha disminuido respecto a las imágenes anteriores, por lo que el pie entra con mayor suavidad a realizar el paso, y también se observa como los pies entran totalmente rectos en lugar de inclinados como se podía observar anteriormente.

### 5.3 MODIFICACIÓN DEL ESTABILIZADOR DEL PASIBOT

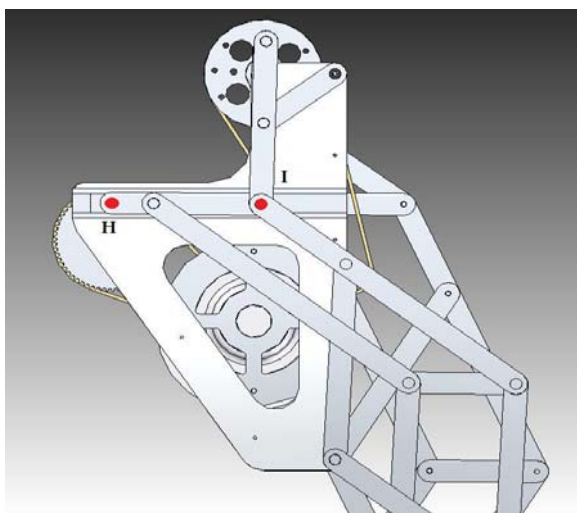
Una vez modificado el centro de gravedad del pasibot, vamos a estudiar la trayectoria del estabilizador para proponer una mejora.

A continuación ilustraremos la trayectoria del estabilizador en los planos X e Y para un ciclo del Pasibot:



**Figura 5.8:** Desplazamiento del estabilizador

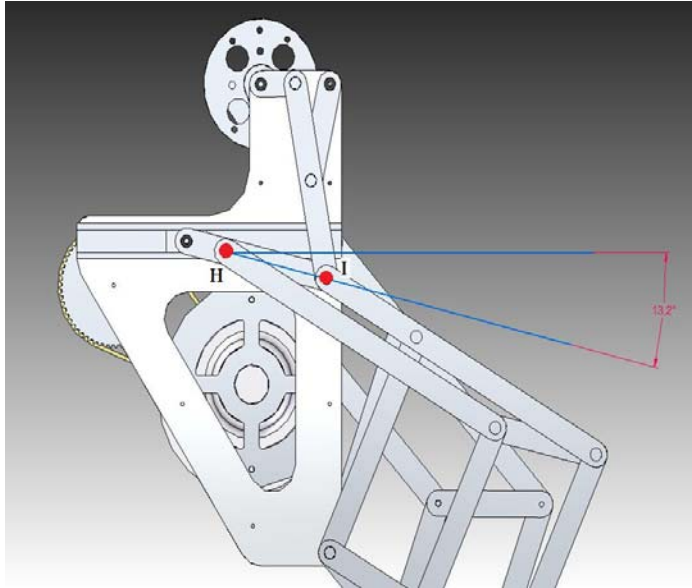
Como podemos observar el estabilizador varia su ángulo con respecto a la horizontal, esto hace que con un mínimo de pérdida de estabilidad antes de apoyar el pie, éste entra con el pico de delante. A continuación mostraremos la misma trayectoria con imágenes sacadas del conjunto de "Solid Edge":



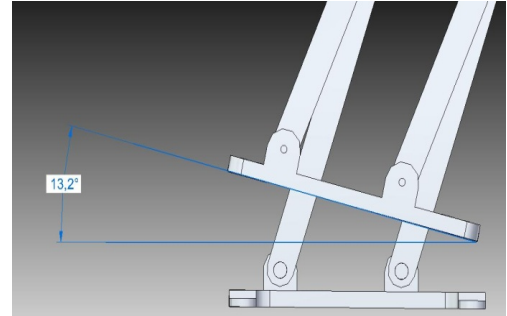
Ésta es la imagen del Pasibot en posición 0, vemos que el estabilizador mantiene una posición horizontal, ésta posición se transmite como podemos ver, primero a la rodilla y seguidamente al pie.

**Figura 5.9:** Estabilizador en la posición "0"

A continuación mostramos la posición extrema donde podemos observar la variación del ángulo del estabilizador:



**Figura 5.11:** Estabilizador para  $\frac{3}{4}$  de ciclo



**Figura 5.10:** Pie para  $\frac{3}{4}$  de ciclo

Como podemos observar el estabilizador se desvía hasta un máximo de 13,2 grados con respecto a la horizontal.

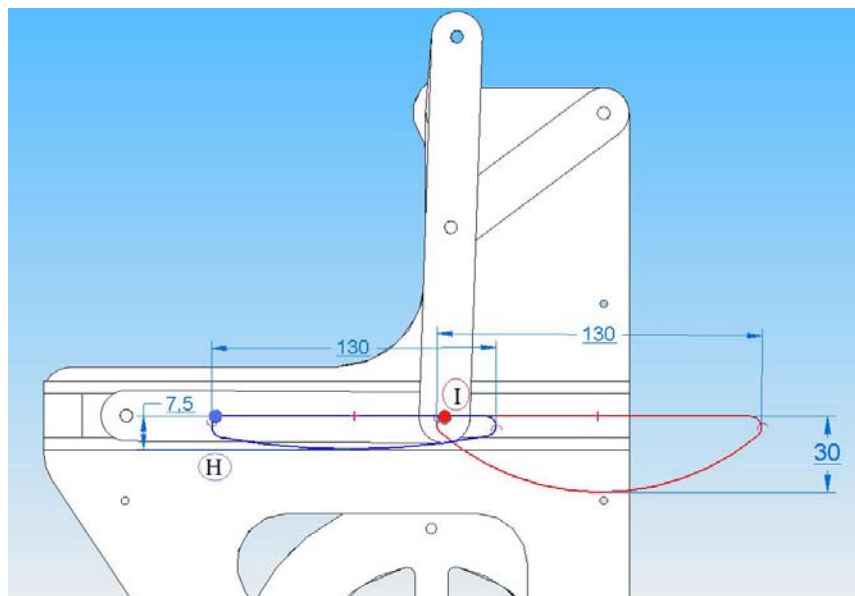
Esto transmite a su vez una desviación de la planta del pie de 13,2 grados

Estos resultados nos conducen a llevar a cabo modificaciones que mejoren el comportamiento del robot bípedo. Para corregir este problema de apoyos nos hemos propuesto diseñar un mecanismo para que la trayectoria de la planta del pie mantenga siempre una posición paralela al suelo. En el modelo inicial el estabilizador (eslabón...) no se mantiene del todo horizontal, el ángulo que se inclina es el mismo ángulo que se le transmite a la planta del pie. Nuestra intención es conseguir que la trayectoria del estabilizador sea únicamente de translación y que su posición sea paralela a la superficie.

Para ello acordamos transformar el estabilizador en una corredera en "T" eliminando el par cinemática de rotación en el punto H y permitiendo únicamente la translación del estabilizador en el plano XY manteniendo una posición horizontal.

## 5.4 DISEÑO DE LA MEJORA PROPUESTA PARA EL ESTABILIZADOR

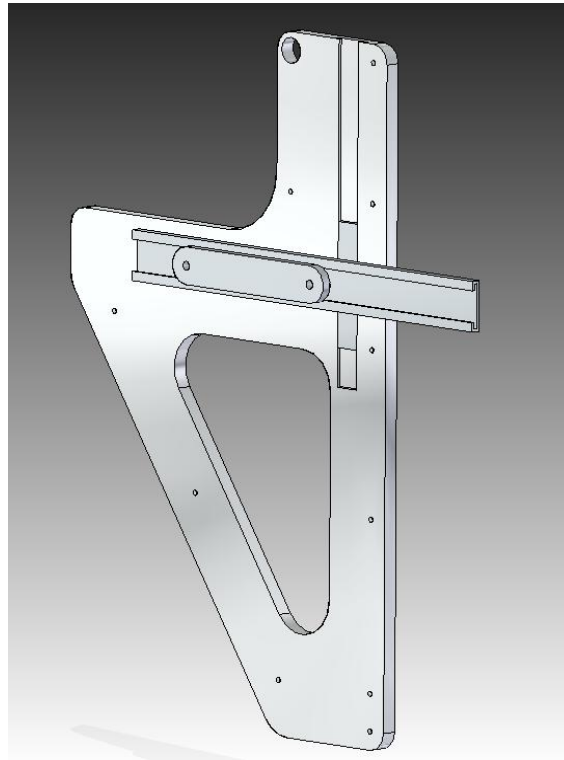
Para empezar tenemos que estudiar la trayectoria del estabilizador para el diseño ya que partimos de unas caderas prediseñadas. Gracias a la curva de los desplazamientos nos hacemos una idea de lo que tiene que desplazarse el estabilizador con respecto a la vertical. Sabemos que el punto I de desplaza alrededor de unos 30 mm hacia abajo con respecto de su posición inicial. Así que con la ayuda del conjunto en "Solid Edge ST" trazamos las trayectorias de los puntos sobre el perfil de la cadera.



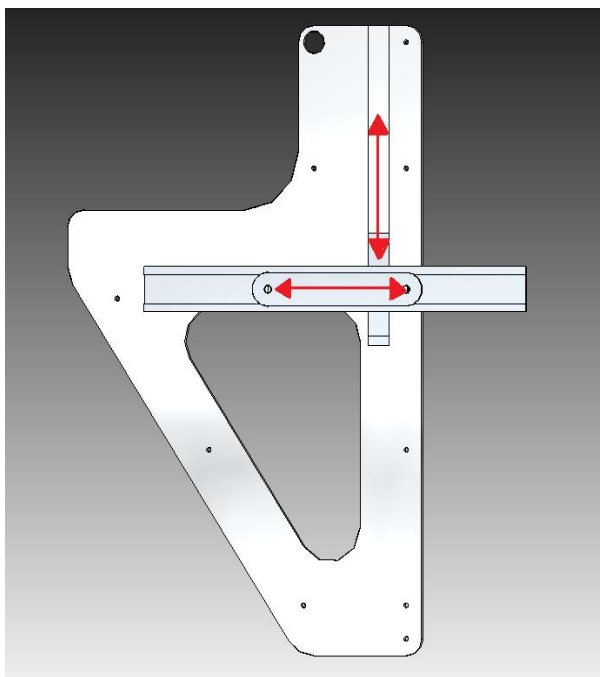
**Figura 5.12:** Trayectorias del estabilizador

Esto nos crea un problema ya que la cadera tiene un vaciado así que no podremos utilizar el mismo lado de la cadera para insertar el modelo de corredera en "T". Por otro lado vemos que el punto I rebasa los bordes delanteros de la cadera. Debido a que ya tenemos un modelo de cadera diseñado, tendremos que efectuar la modificación sobre su propio perfil.

Después de un análisis de todas las posibles alternativas, diseñamos el modelo siguiente:



**Figura 5.13:** Nuevo diseño del estabilizador.

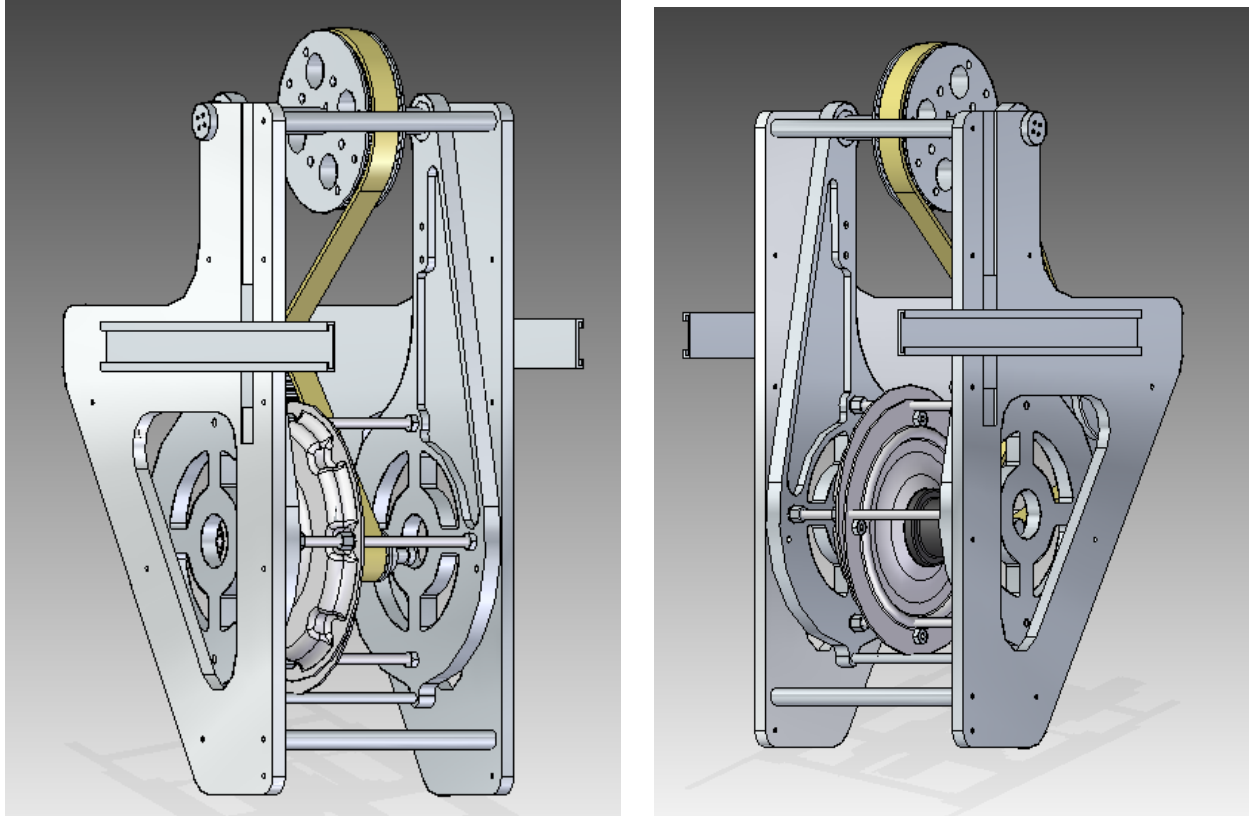


Nuestra modificación consiste en abarcar el movimiento vertical del estabilizador colocando una guía vertical en el único lado posible de la cadera que es borde delantero.

Por ella introducimos una deslizadera que a su vez hace de guía horizontal a nuestro nuevo estabilizador, esta tiene que rebasar el borde de la cadera para poder abarcar la totalidad del movimiento horizontal del estabilizador.

**Figura 5.14:** Nueva corredera en “T”

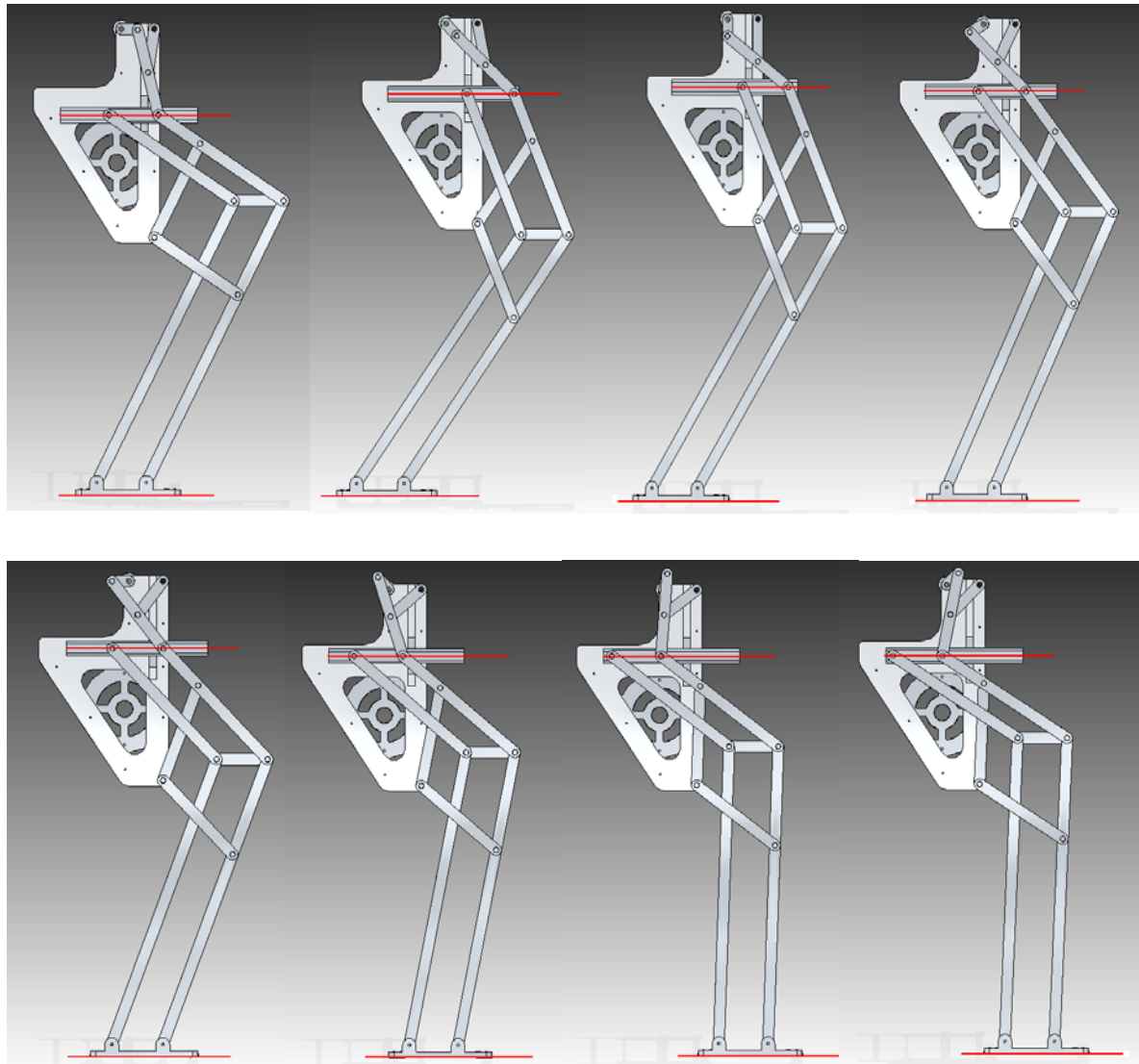
Tras la introducción de este nuevo mecanismo la cadera y el sistema de transmisión quedan de la siguiente forma:



**Figura 5.15:** Caderas con nuevo mecanismo

Como podemos observar con esta mejora el estabilizador se mantiene siempre en posición horizontal lo que hace que la planta del pie se mantenga siempre también paralela al suelo. Esto mejora notablemente el paso del pasibot a simple vista. Procederemos luego en reafirmarlo mediante un estudio más a fondo con el programa Adams.

A continuación se observa como las trayectorias de los pies y el estabilizador se mantienen siempre paralelas al suelo a lo largo de todo el ciclo completo de giro de la manivela.



**Figura 5.16:** Mejora de las trayectorias de los pies y el estabilizador

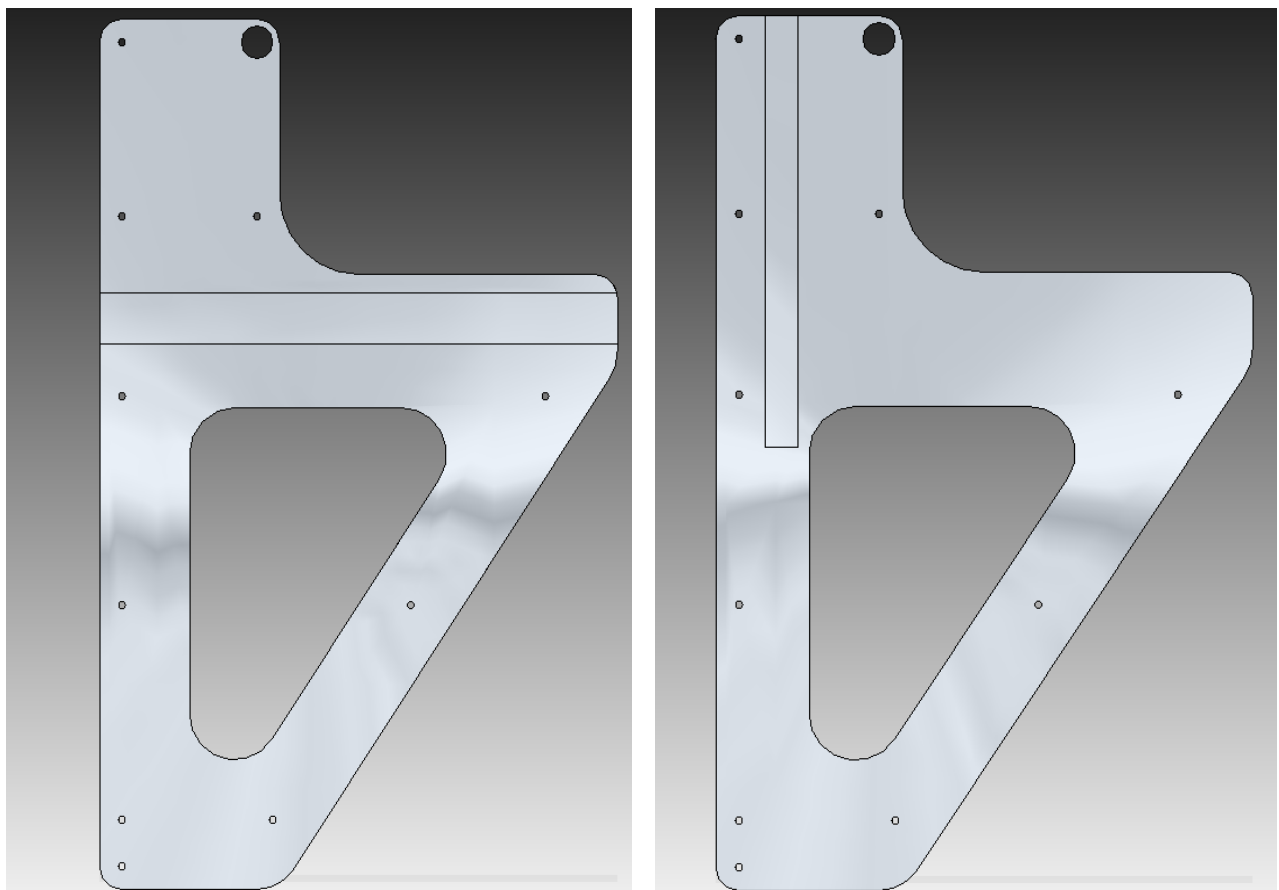


## 5.5 COMPARACIÓN DE LAS PIEZAS MODIFICADAS

A continuación se exponen las piezas que han sufrido modificaciones para cambiar el sistema de transmisión, por el sistema de corredera en “T”, (los planos de las mismas se encuentran en los *Anexos* al final del documento).

Se trata únicamente de tres piezas, por lo que supone un cambio relativamente fácil y sencillo con el cual se conseguirá modificar el desplazamiento del estabilizador y con él el del resto de eslabones, hasta llegar a los pies en los que se obtienen trayectorias paralelas al suelo a lo largo de todo el ciclo:

### CADERA



**Figura 5.17:** Cadera original (izq) y modificada (dcha)

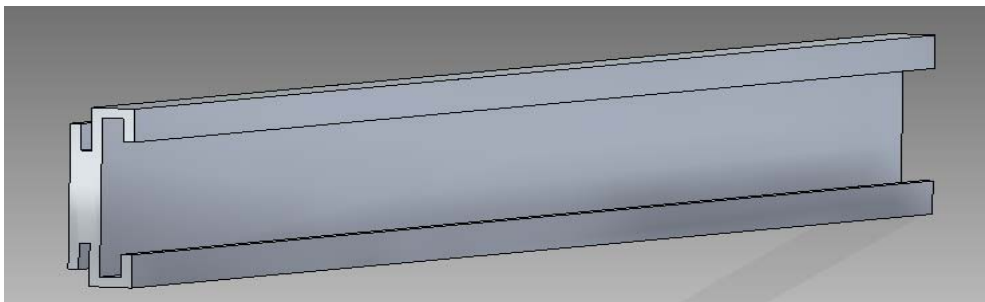
**ESTABILIZADOR**

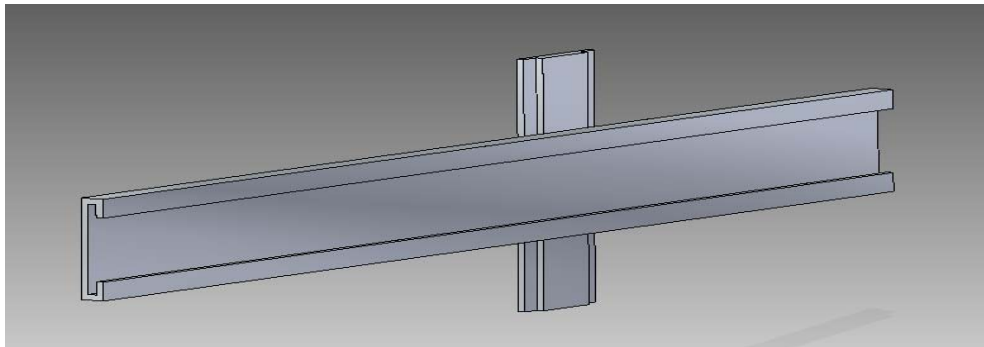


**Figura 5.18:** Estabilizador original (arriba) y modificado (abajo)

En el estabilizador original observamos que tiene 3 orificios y sin embargo el modificado solamente dos. Esto es debido a que en ese tercer orificio el estabilizador original enganchaba con la **deslizadera** que ha sido suprimida en el nuevo diseño.

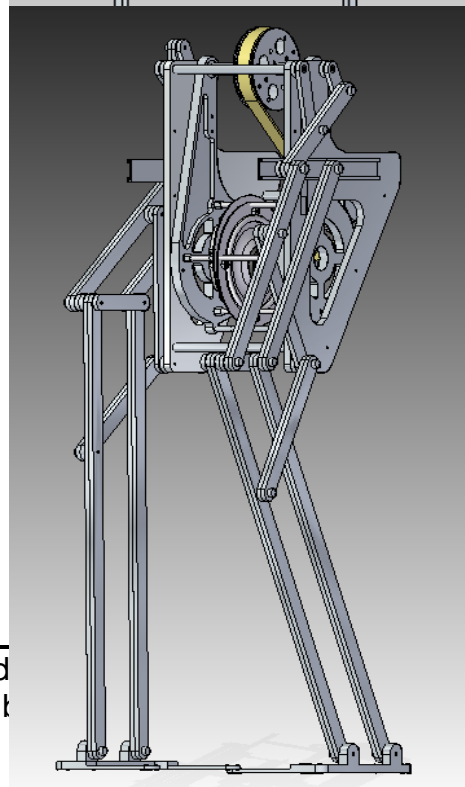
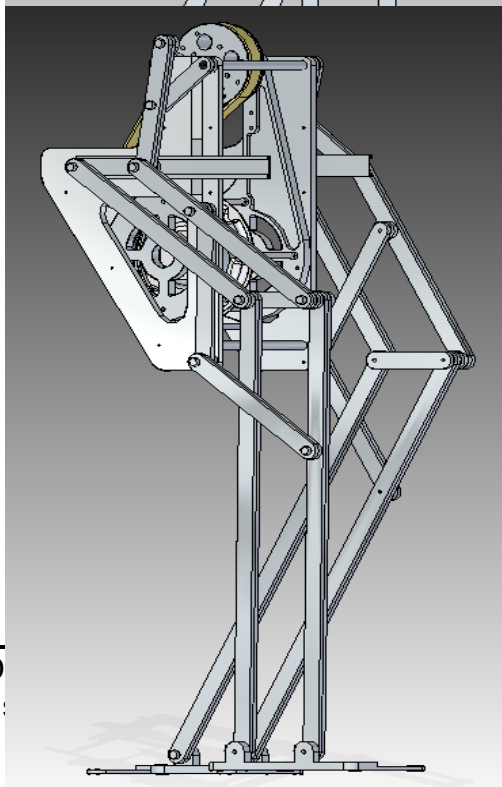
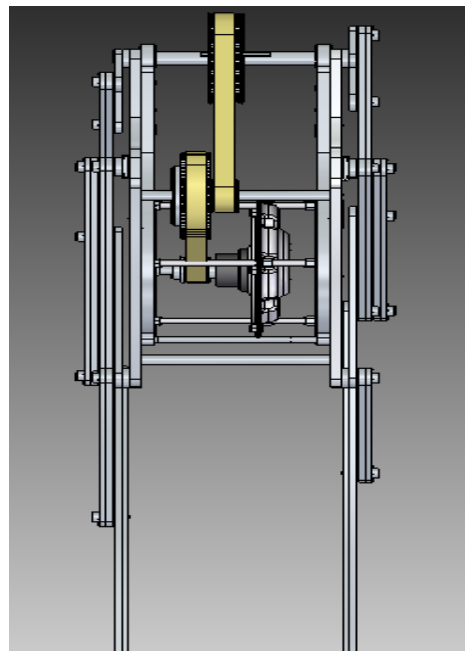
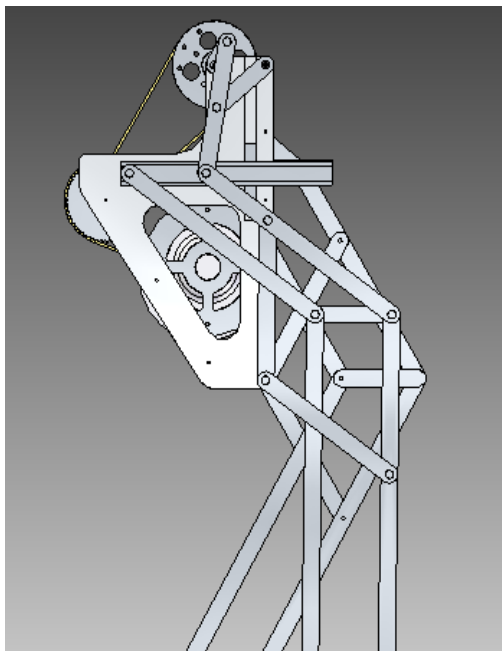
**CORREDERA**

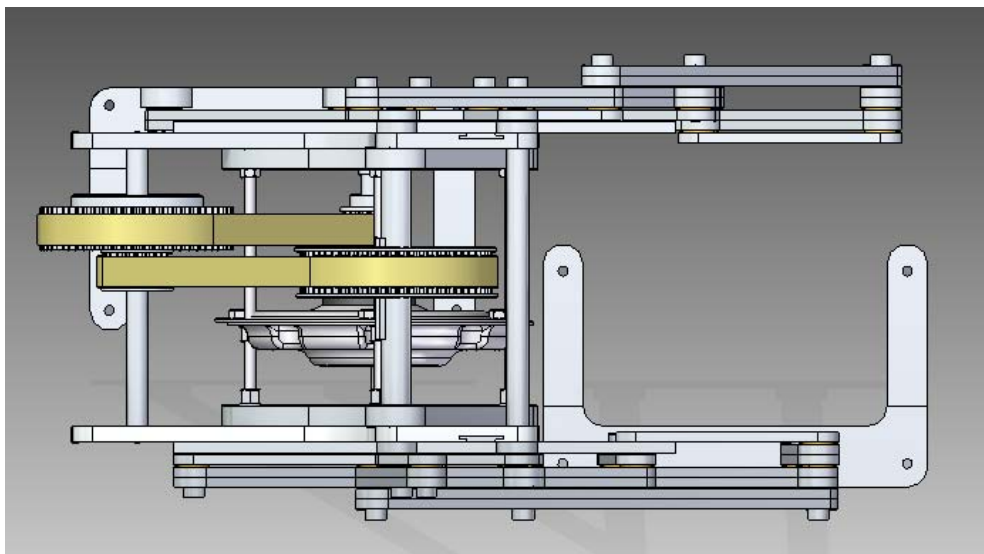




**Figura 5.19:** Corredera original (arriba) y modificada (abajo)

Tras las modificaciones realizadas obtenemos un nuevo modelo de Pasibot cuyas imágenes se muestran a continuación:





**Figura 5.20:** Pasibot modificado

Con este nuevo sistema de transmisión, se consigue que la entrada del pie sea totalmente paralela al suelo mejorando así la estabilidad del mismo y evitando el balanceo hacia los lados que se producía en el anterior modelo a la hora de caminar.

Para contrastar esta mejora se realizará un amplio estudio en el programa *MSC. ADAMS* de ambos modelos: original y modificado. Se obtendrán las curvas de desplazamientos, velocidad y aceleración de los puntos de articulación del mecanismo de Chebyshev y del Pantógrafo y se compararán para observar las mejoras introducidas en el diseño.



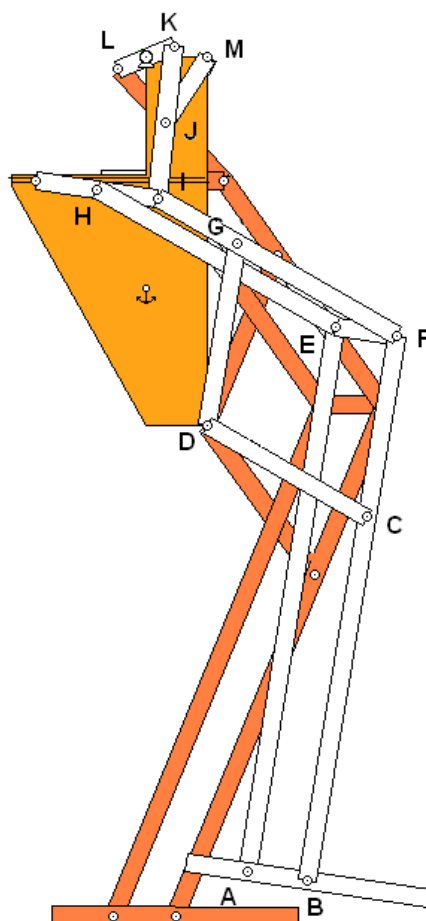
## Capítulo VI:

# *ANÁLISIS Y RESULTADOS*

En este estudio se va a analizar la respuesta dinámica del Pasibot original y modificado con la nueva corredera en “T”. Para ello se utilizará el programa *MSC. ADAMS* y su *post procesador*.

Se realizará el estudio de desplazamientos, velocidades y aceleraciones de todas las articulaciones presentes en los mecanismos de Chebyshev y Pantógrafo, para cuatro velocidades angulares del motor diferentes: 90°/s, 180°/s, 270°/s y 360°/s.

Para realizar un estudio de manera más adecuada y ordenada, se ha dotado de una letra a cada articulación para tenerlas más fácilmente identificadas. La nomenclatura se muestra a continuación:

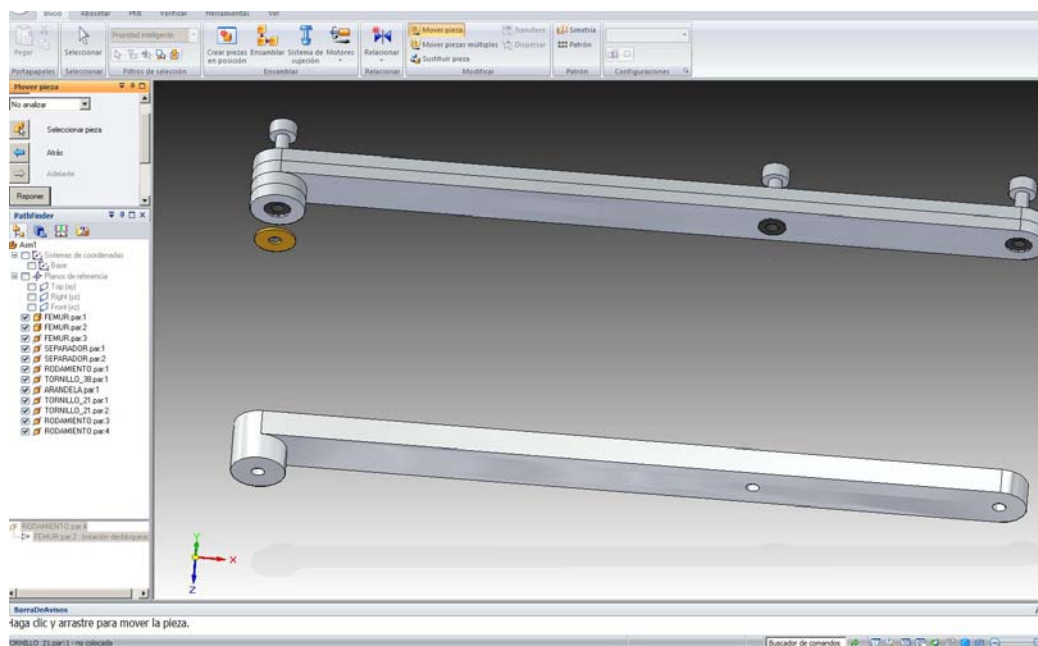


**Figura 6.1:** Nomenclatura articulaciones Pasibot original

Para empezar el estudio, se necesita importar el modelo del Pasibot del programa *Solid Edge ST*<sup>®</sup> al programa *MSC. ADAMS*<sup>®</sup>. Para ello se guardará el modelo en formato **“parasolid”** el cual es compatible para ambos programas, y se seguirán los pasos anteriormente descritos en el capítulo III para la importación de archivos.

Para el estudio del Pasibot se ha utilizado un modelo simplificado del modelo creado en Solid Edge, para evitar sobrecargas en el programa Adams. Este hecho es posible debido a que Adams es un programa que estudia el comportamiento del sólido rígido y no tiene en cuenta ni las deformaciones ni el contacto entre los diferentes componentes.

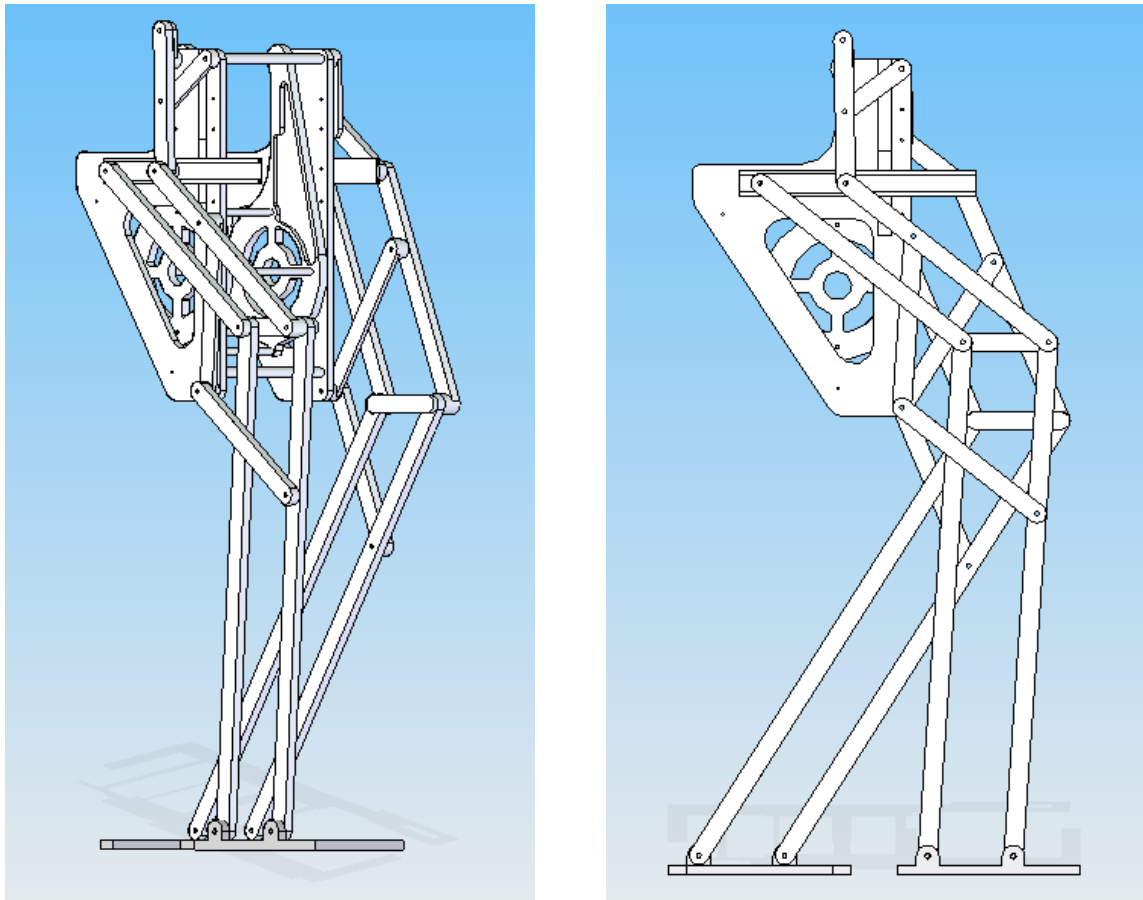
Se ha creado por lo tanto un modelo simplificado en el que se han suprimido todo tipo de arandelas, rodamientos, separadores y tornillos, también se ha simplificado el modelo de eslabón reduciéndolo a una sola pieza en vez de las dos de las que consta el prototipo, y donde tampoco se ha exportado el sistema motriz (motor, engranajes, correas, etc) para evitar la sobrecarga del software. Los tornillos no son necesarios ya que obtenemos la misma función con la inserción de juntas entre los diferentes eslabones quedando de este modo:



**Figura 6.2:** Simplificación del fémur para Adams

Como podemos observar con la reducción se pasa de 15 piezas a una sola. Esto facilita enormemente el manejo del conjunto en Adams.

Utilizando esta misma técnica para todas las piezas que forman parte del conjunto obtenemos el siguiente modelo, que será el finalmente utilizado:



**Figura 6.3:** Pasibot simplificado para Adams

Una vez que tenemos el modelo solo falta importarlo al programa y comenzar el estudio.





## 6.1 ESTUDIO DINÁMICO DEL PASIBOT ORIGINAL

En primer lugar se hará un estudio de la dinámica del Pasibot original. Para ello comenzaremos por analizar las curvas de desplazamientos, posteriormente las velocidades y finalmente las aceleraciones.

A continuación se exponen las gráficas obtenidas con el post procesador.

### 6.1.1 Desplazamientos

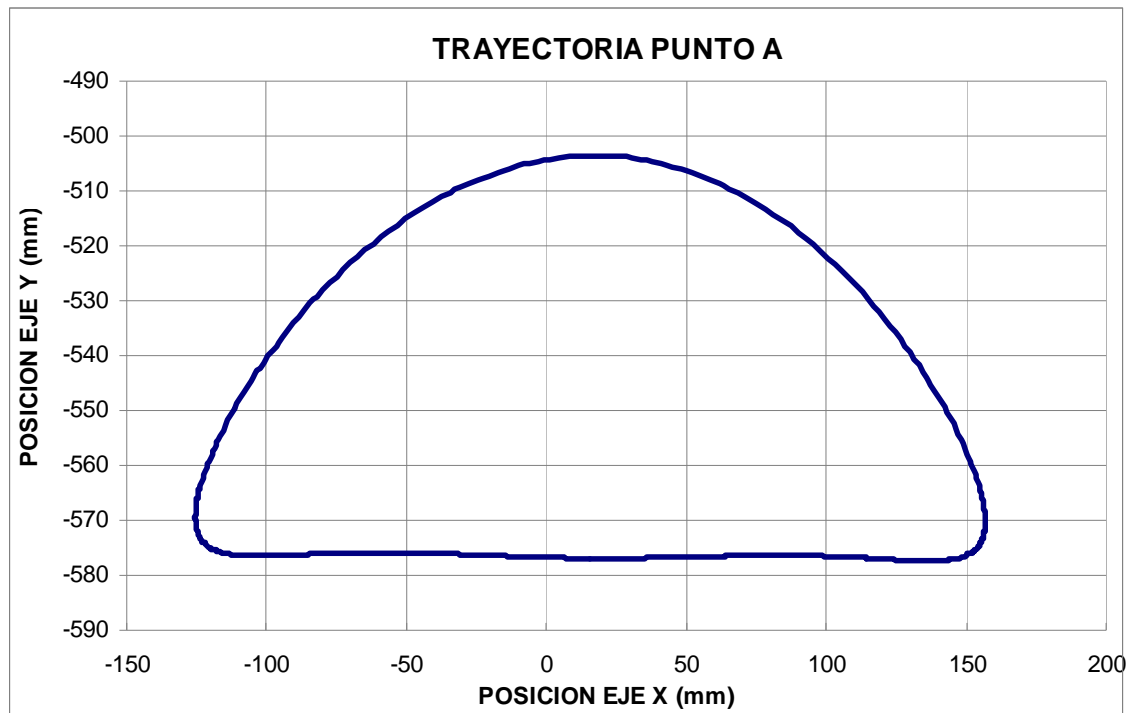
La trayectoria del punto D es nula, debido a que se trata del punto de pivotaje del mecanismo de Pantógrafo.

La trayectoria de los puntos L y M es nula, debido a que son los puntos de pivotaje del mecanismo de Chebyshev.

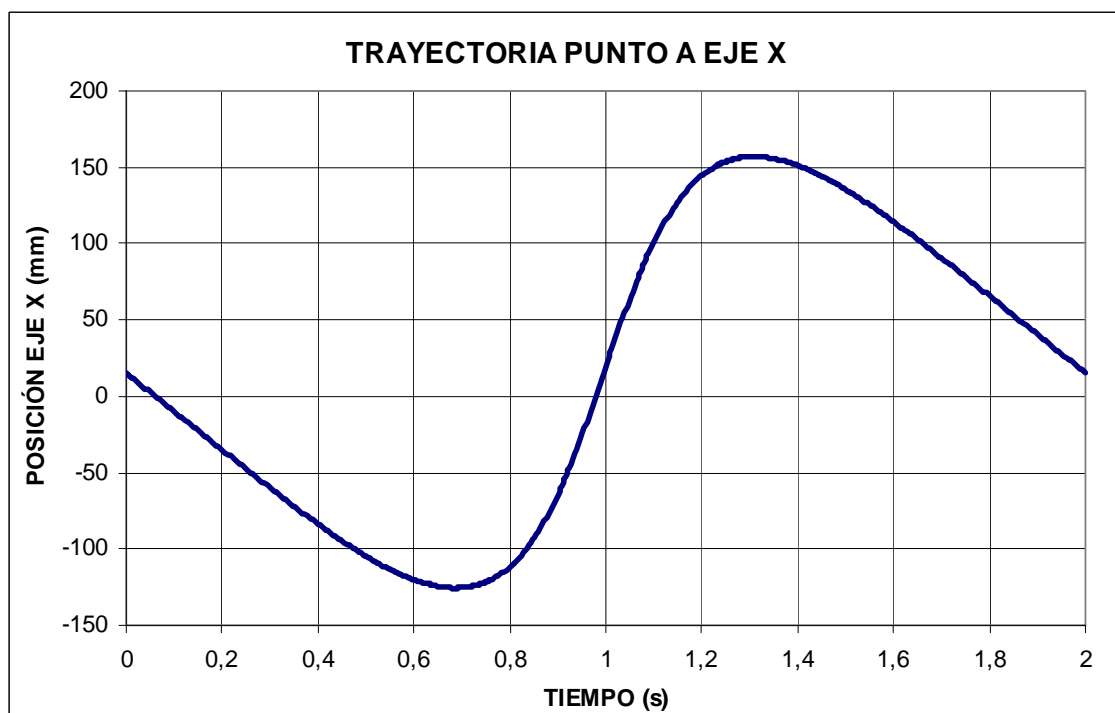
Los puntos sobre los que se centrará el estudio son los puntos A, E y H, que son sobre los que se obtienen resultados diferentes en uno y otro modelo. Las trayectorias de los demás puntos se pueden consultar en el *Anexo* del documento.

Gráficas de desplazamientos de los puntos de estudio A, E y H:

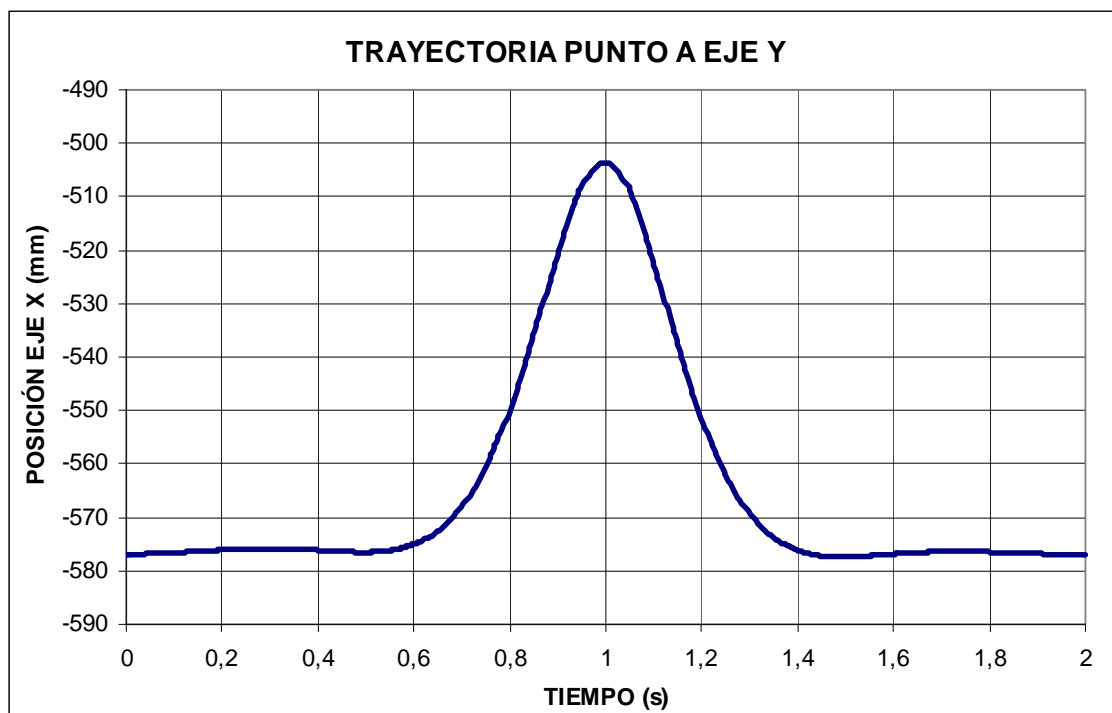
### Punto A



**Figura 6.4:** Trayectoria punto A Pasibot original



**Figura 6.5:** Trayectoria punto A eje X Pasibot original

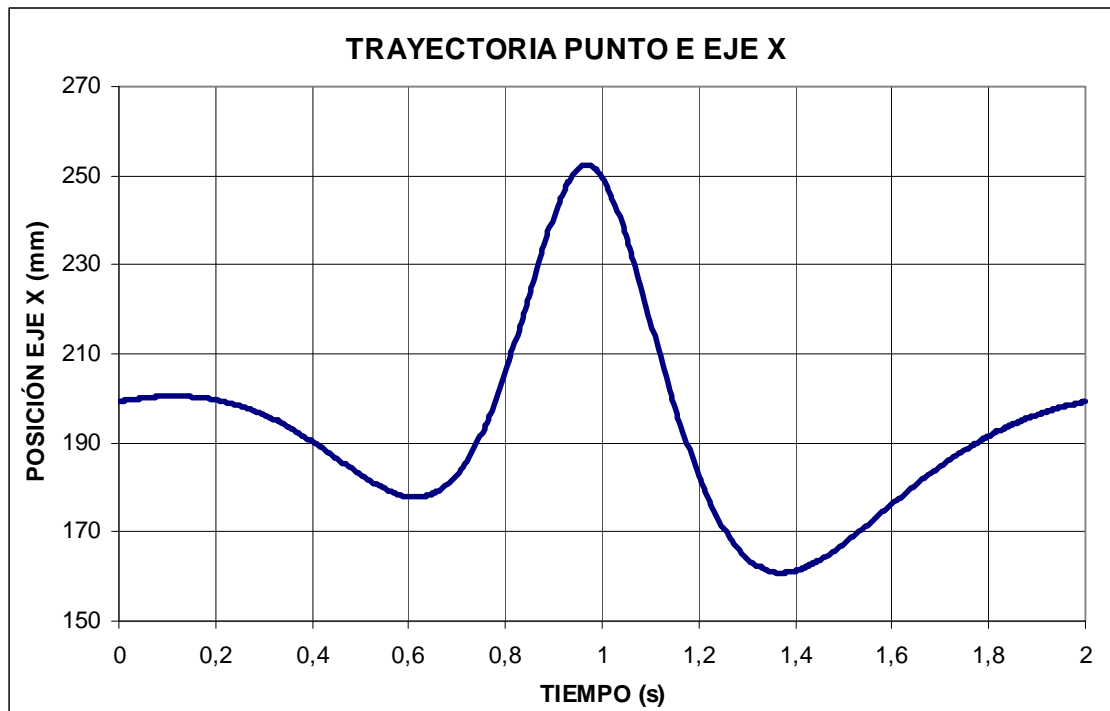


**Figura 6.6:** Trayectoria punto A eje Y Pasibot original

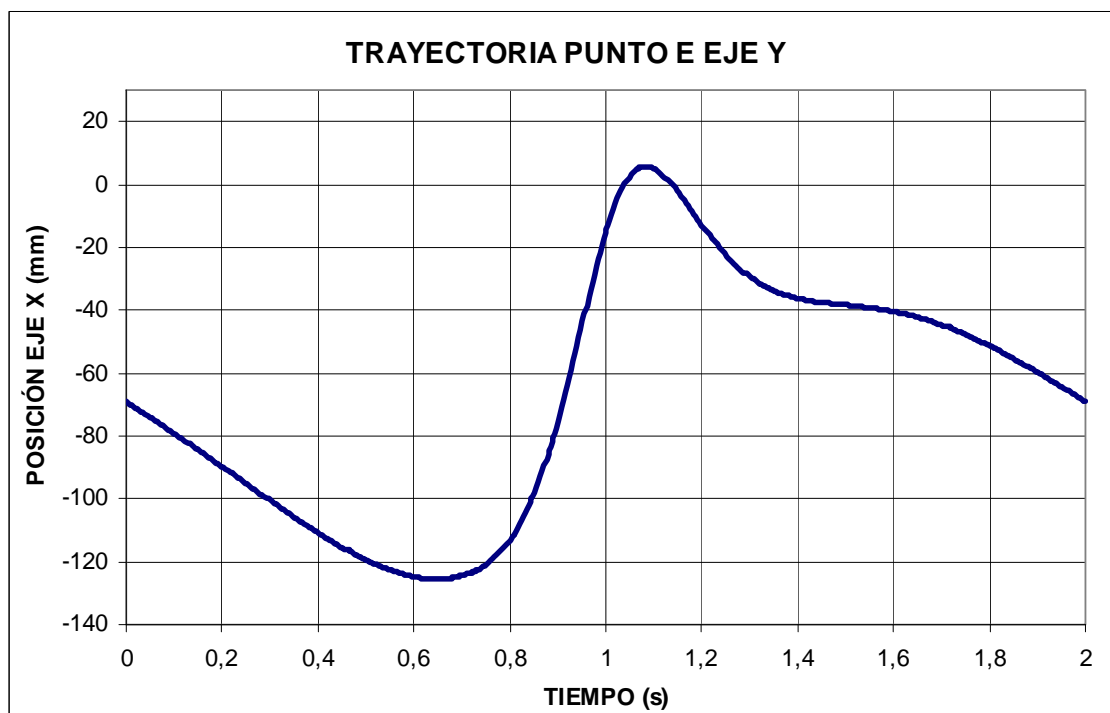
### Punto E



**Figura 6.7:** Trayectoria punto E Pasibot original

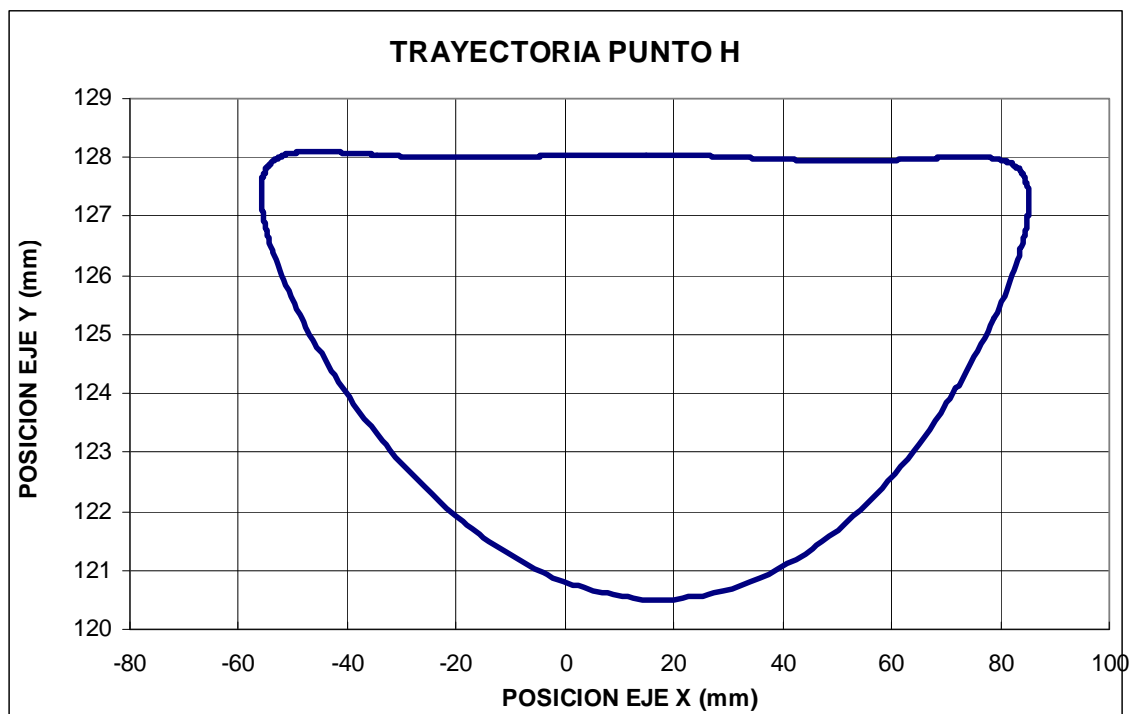


**Figura 6.8:** Trayectoria punto E eje X Pasibot original

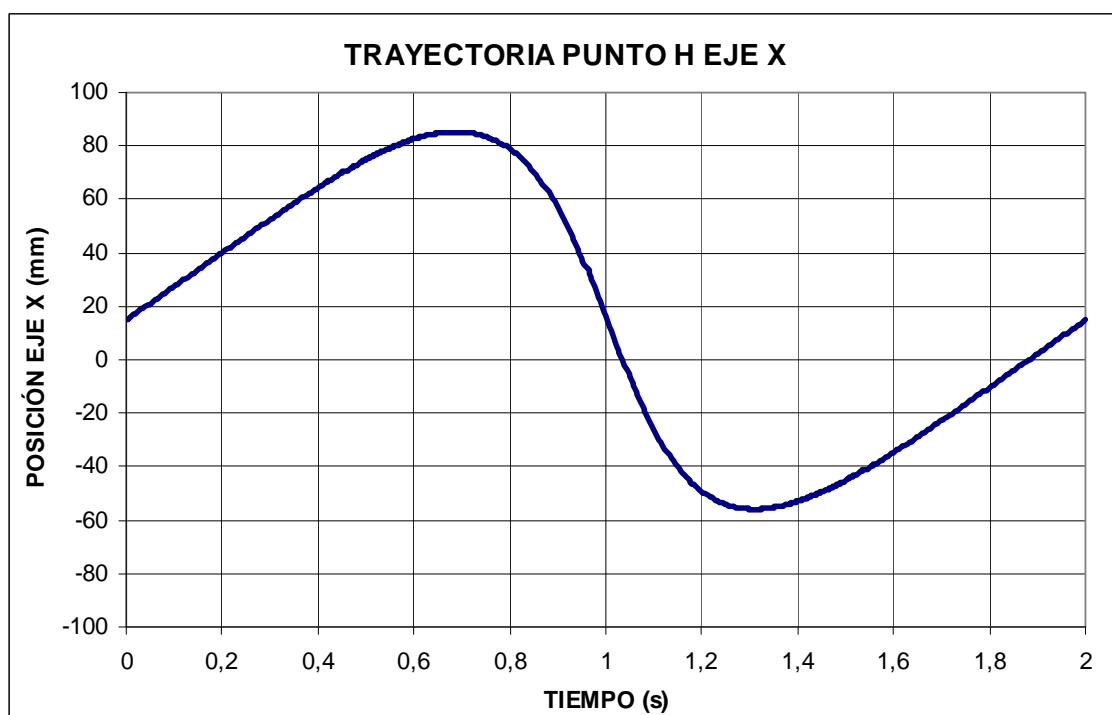


**Figura 6.9:** Trayectoria punto E eje Y Pasibot original

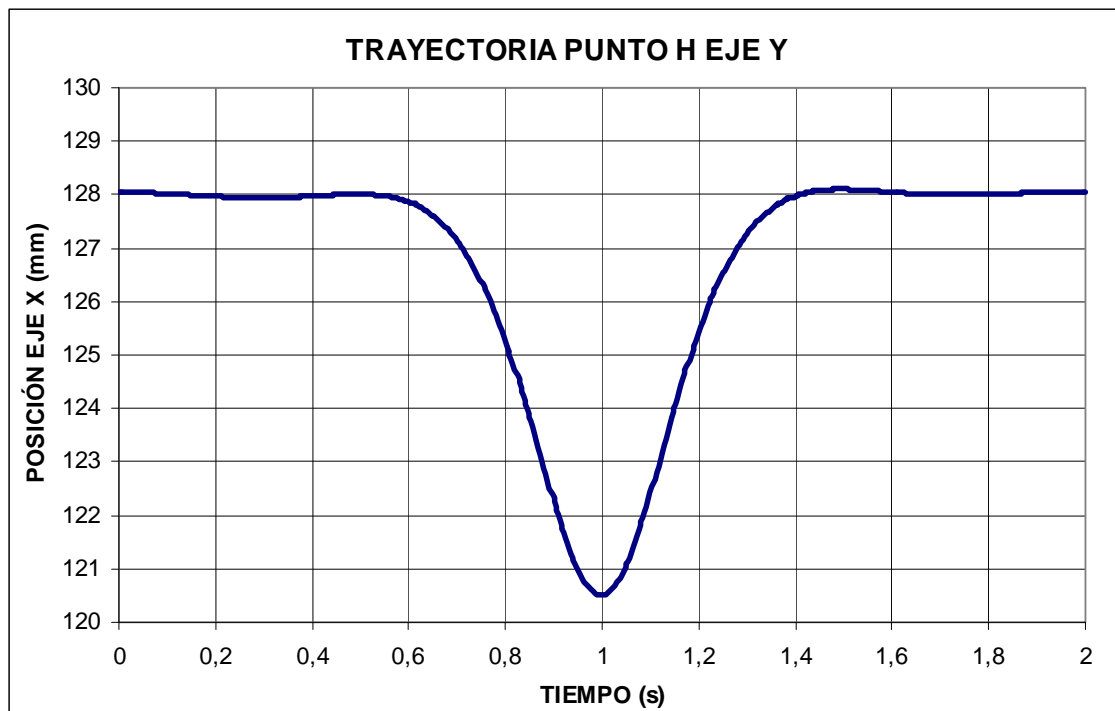
## Punto H



**Figura 6.10:** Trayectoria punto H Pasibot original



**Figura 6.11:** Trayectoria punto H eje X Pasibot original



**Figura 6.12:** Trayectoria punto H eje Y Pasibot original

### 6.1.2 Velocidades

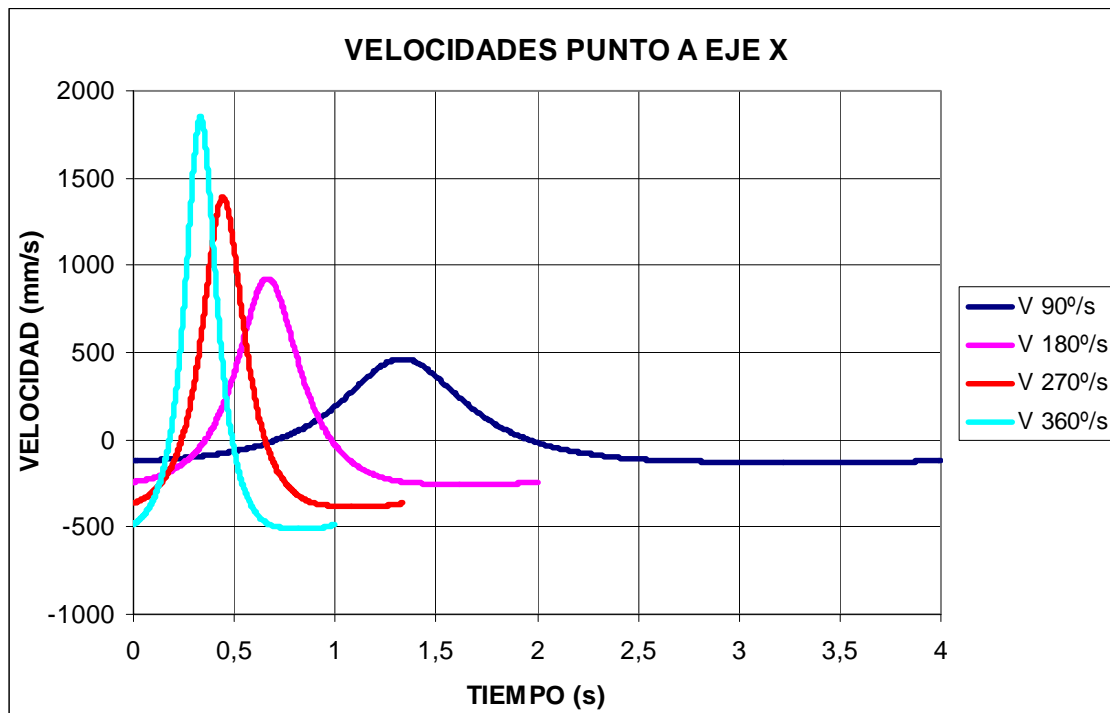
La velocidad del punto D es nula, debido a que se trata del punto de pivotaje del mecanismo de Pantógrafo.

Las velocidades de los puntos L y M son nulas, debido a que son los puntos de pivotaje del mecanismo de Chebyshev.

Gráficas de velocidades de todos los puntos del Pasibot para las siguientes velocidades de rotación del motor:  $90^\circ/\text{s}$ ;  $180^\circ/\text{s}$ ;  $270^\circ/\text{s}$  y  $360^\circ/\text{s}$ .

El resto de las gráficas (B, C, D, F, G, I, J, K) se pueden consultar en los Anexos del documento, ya que son iguales para ambos mecanismos.

### Punto A eje X



**Figura 6.13:** Velocidades punto A eje X Pasibot original

Las gráficas que resultan de realizar el estudio en Adams, son las que se muestran en la figura adjunta. Obtenemos las gráficas desplazadas unas respecto de otras, ya que para las diferentes velocidades de giro del motor, el mecanismo tarda un tiempo u otro en realizar un ciclo completo. Las velocidades y tiempos correspondientes son las que se muestran a continuación:

V 90°/s → 4 segundos

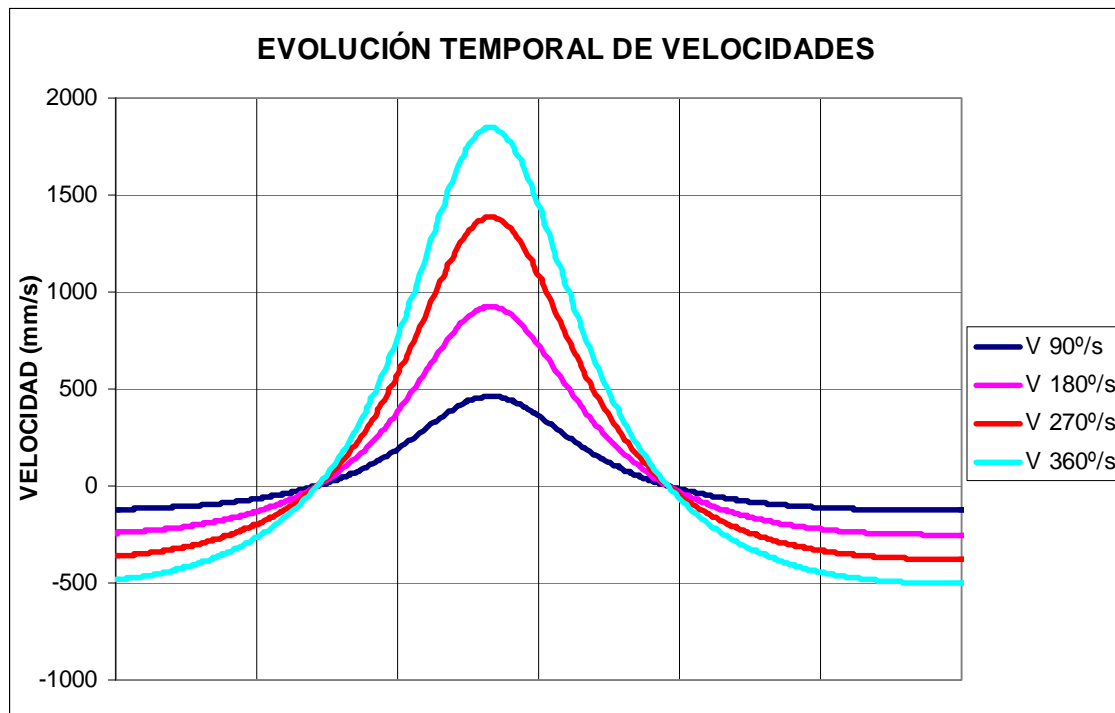
V 180°/s → 2 segundos

V 270°/s → 1,33 segundos

V 360°/s → 1 segundo

Estas gráficas no resultan del todo adecuadas para nuestro propósito de realizar un análisis de las mismas comparándolas con las gráficas del modelo modificado, debido a que no se aprecia de forma clara cuales son las velocidades de las articulaciones, para cada una de las 4 velocidades de giro del motor.

Para poder realizar un análisis adecuado se decidió modificar la gráfica y obtener todas las curvas al mismo nivel temporal. Este nuevo gráfico nos ayudará a analizar de una forma más clara y óptima los resultados a obtener, llegando a las conclusiones adecuadas.

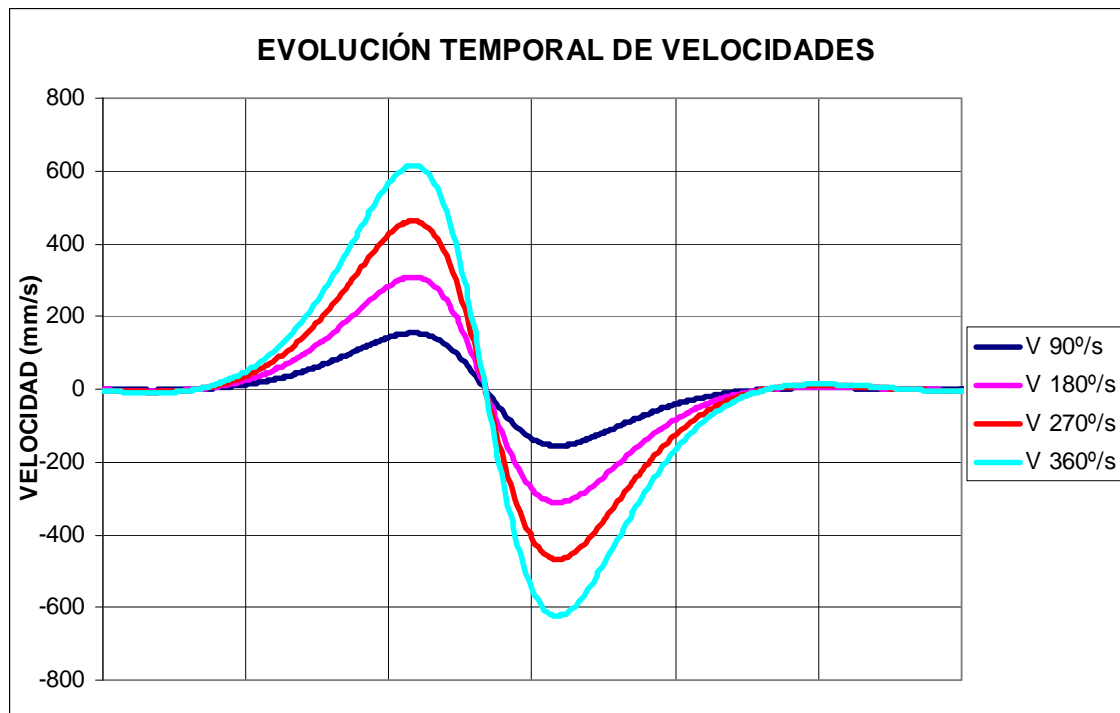


**Figura 6.13-1:** Evolución temporal de velocidades Punto A eje X Pasibot original

En este nuevo gráfico, se puede observar comparando con el primero obtenido, que los valores de velocidad que se obtienen para las cuatro curvas son iguales, por lo tanto como lo que nos interesa obtener son los valores de velocidad independientemente del espacio temporal en el que ocurren, se considera que este tipo de gráfico es el más adecuado para llevar a cabo el análisis. Por ello, el resto de gráficas que se utilizan a continuación son como la mostrada anteriormente.

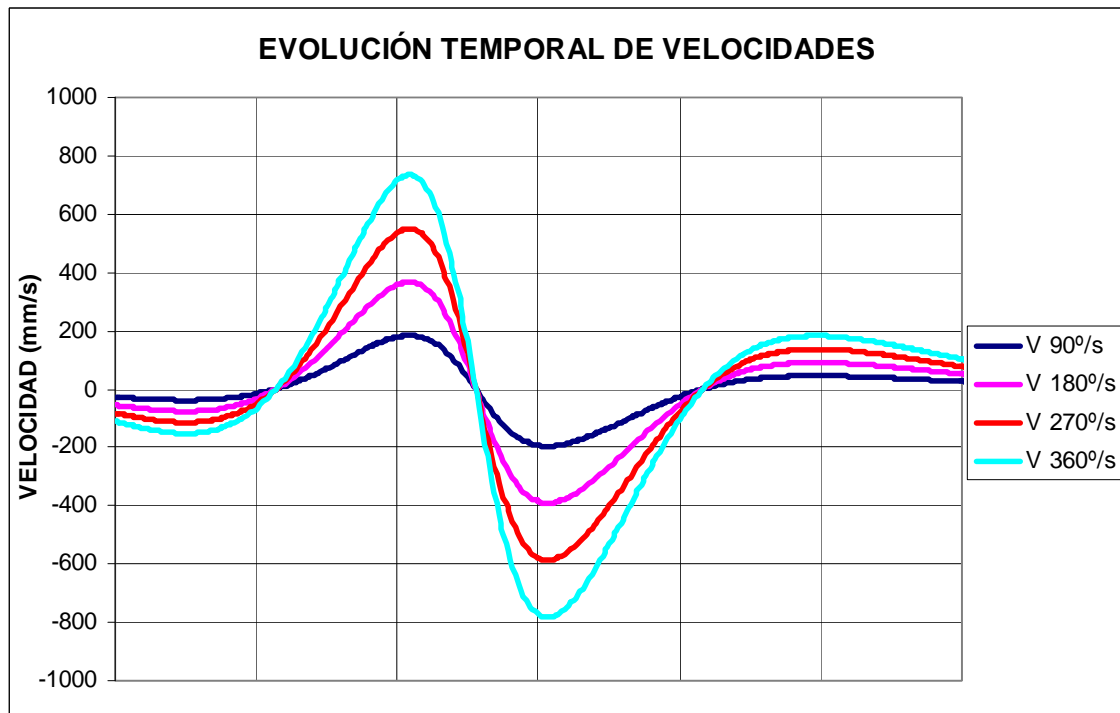


### Punto A eje Y



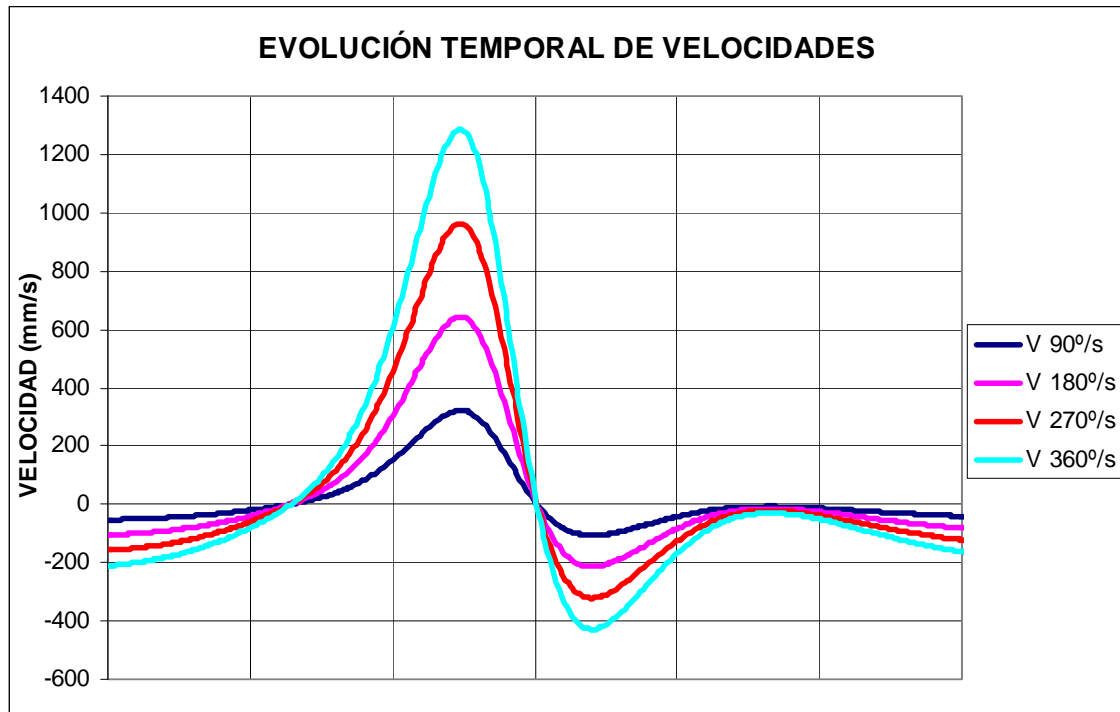
**Figura 6.14:** Velocidades punto A eje Y Pasibot original

### Punto E eje X



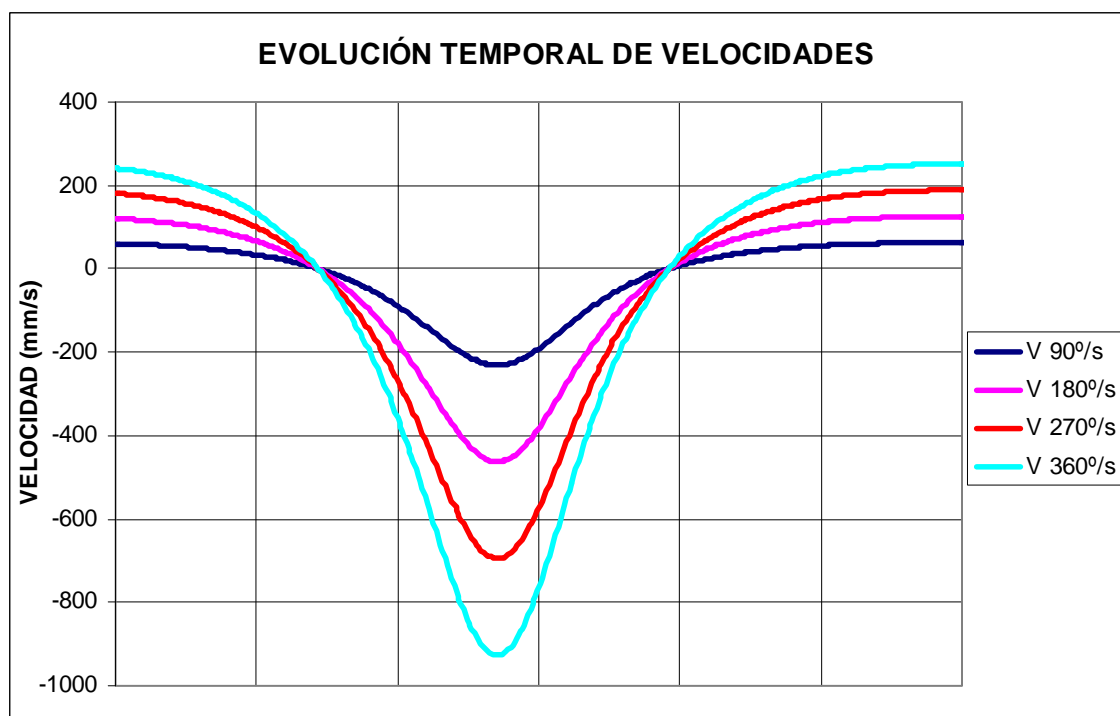
**Figura 6.15:** Velocidades punto E eje X Pasibot original

### Punto E eje Y



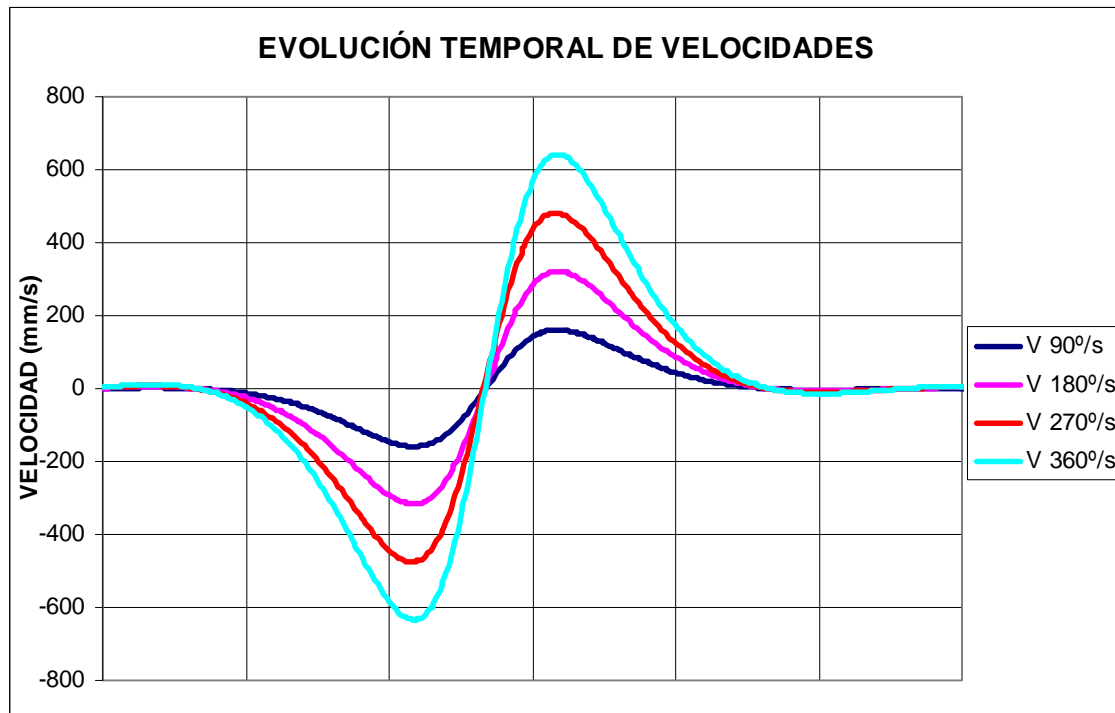
**Figura 6.16:** Velocidades punto E eje Y Pasibot original

### Punto H eje X



**Figura 6.17:** Velocidades punto H eje X Pasibot original

### Punto H eje Y



**Figura 6.18:** Velocidades punto H eje Y Pasibot original

### 6.1.3 Aceleraciones

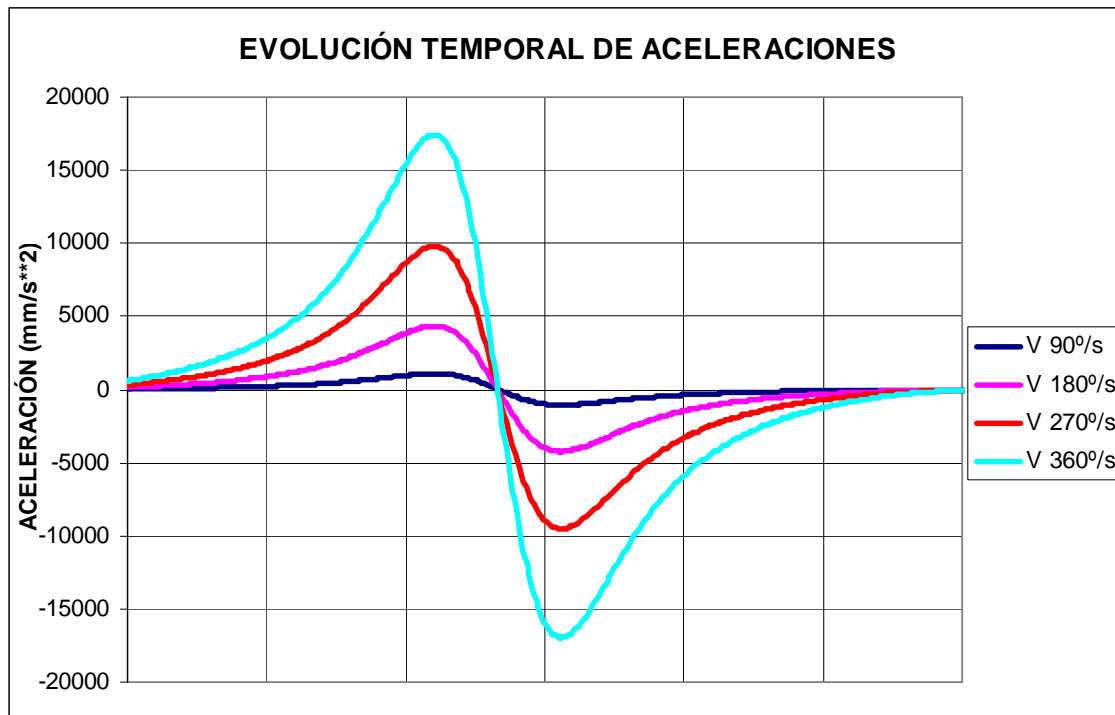
La aceleración del punto D es nula, debido a que se trata del punto de pivotaje del mecanismo de Pantógrafo.

Las aceleraciones de los puntos L y M son nulas, debido a que son los puntos de pivotaje del mecanismo de Chebyshev.

Gráficas de aceleraciones de todos los puntos del Pasibot para las siguientes velocidades de rotación del motor: 90°/s; 180°/s; 270°/s y 360°/s.

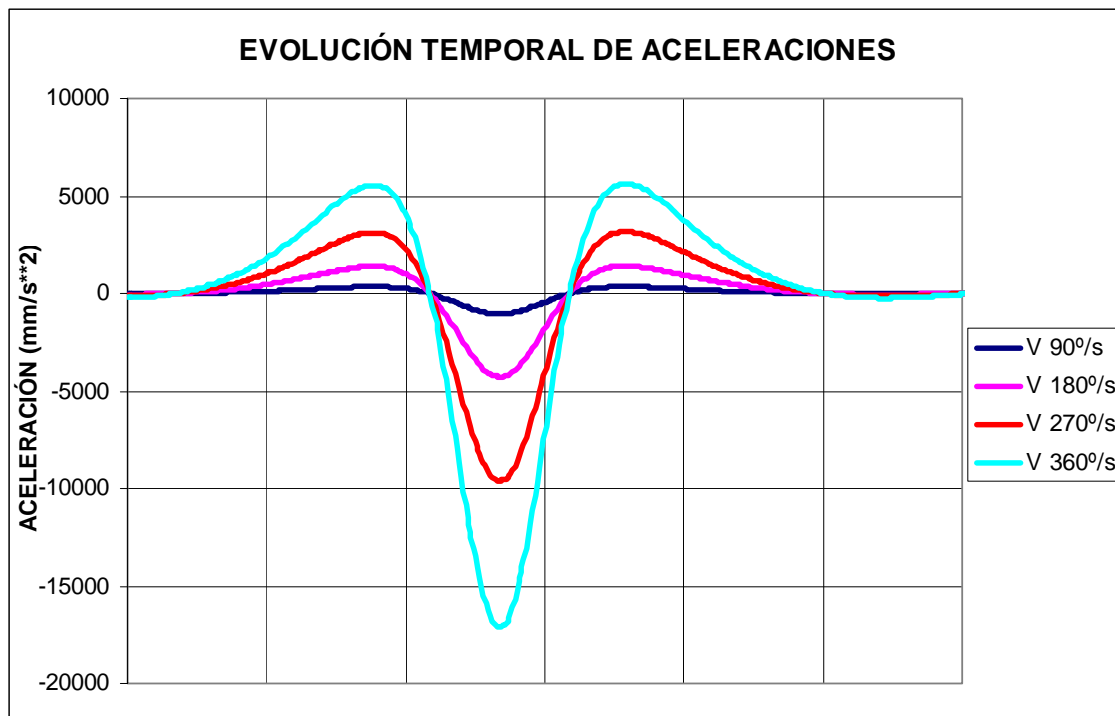
El resto de las gráficas (B, C, D, F, G, I, J, K) se pueden consultar en los *Anexos* del documento, ya que son iguales para ambos mecanismos.

### Punto A eje X

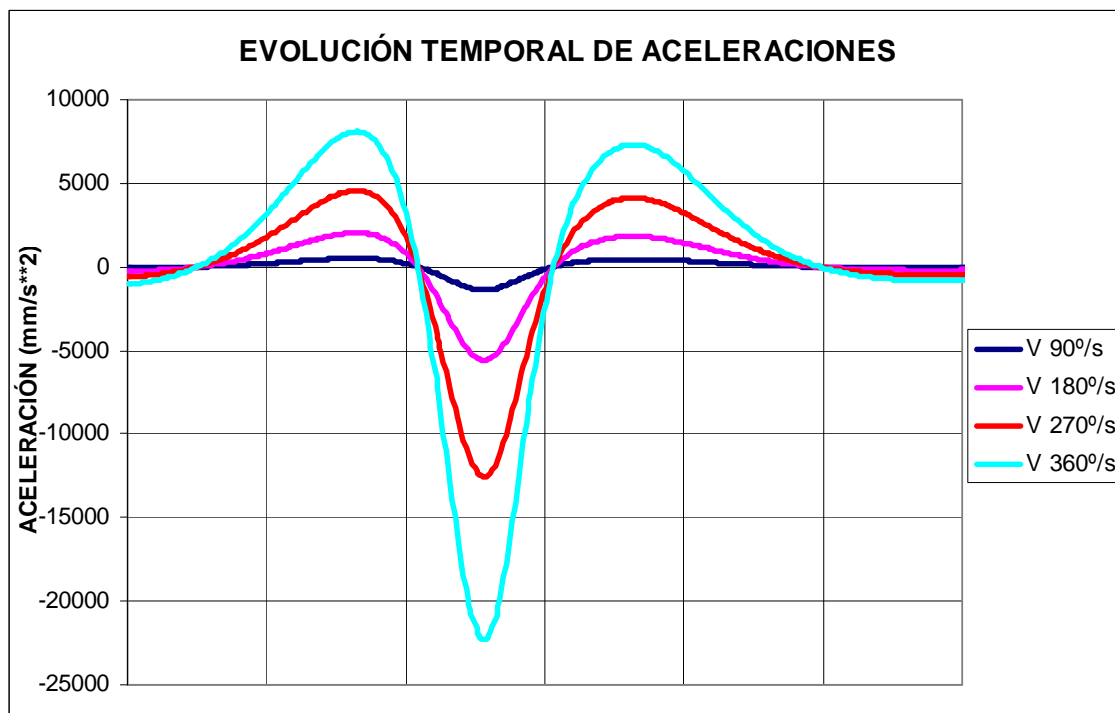


**Figura 6.19:** Aceleraciones punto A eje X Pasibot original

### Punto A eje Y

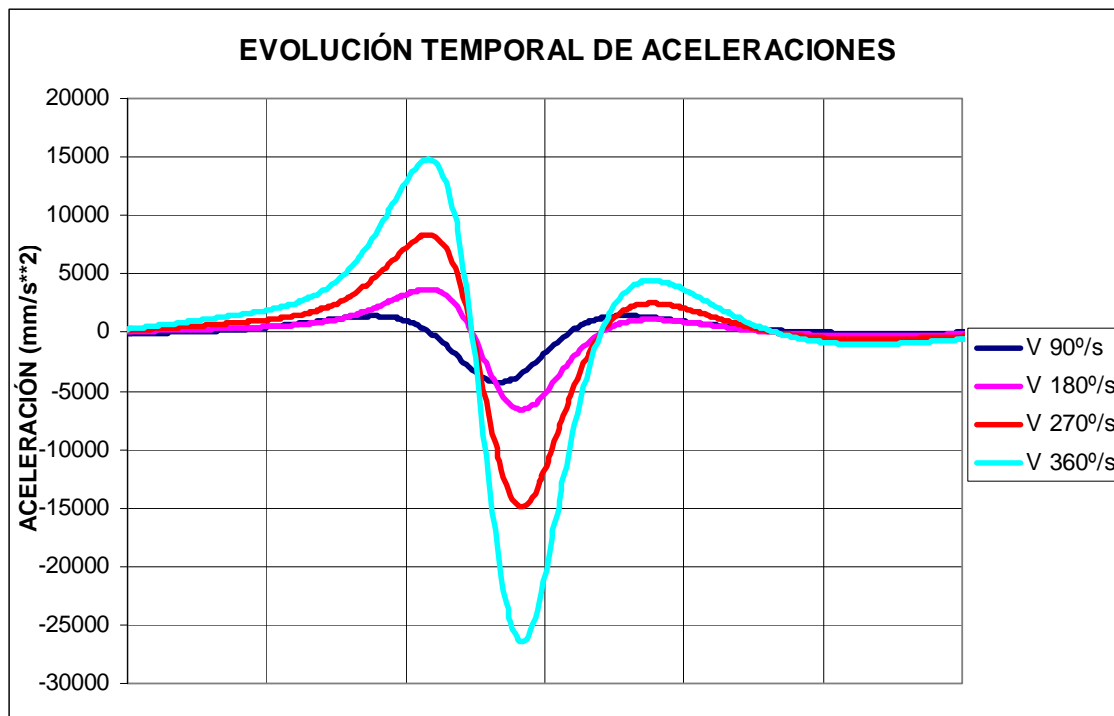


**Figura 6.20:** Aceleraciones punto A eje Y Pasibot original  
**Punto E eje X**

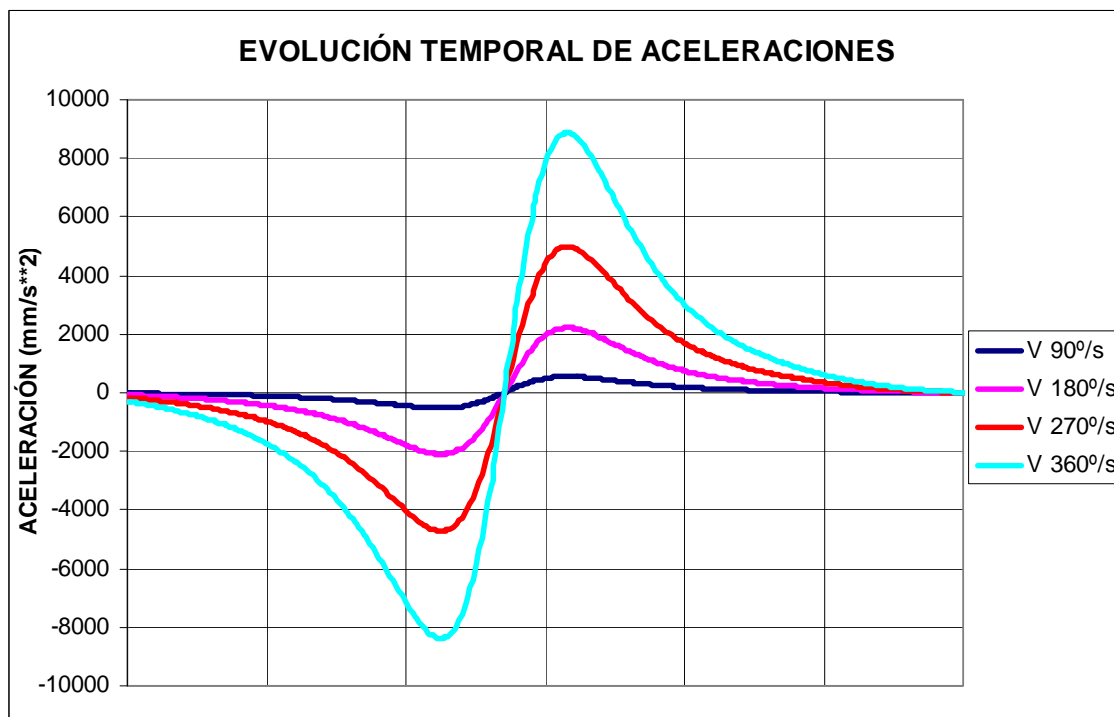


**Figura 6.21:** Aceleraciones punto E eje X Pasibot original

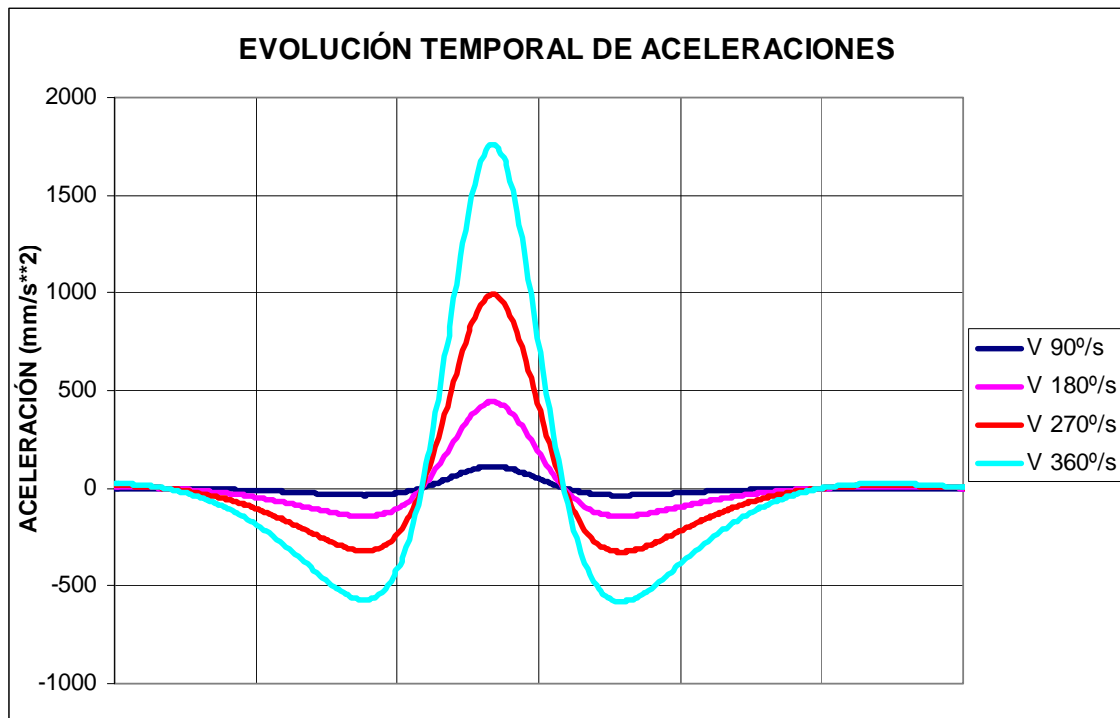
**Punto E eje Y**



### Punto H eje X



### Punto H eje Y

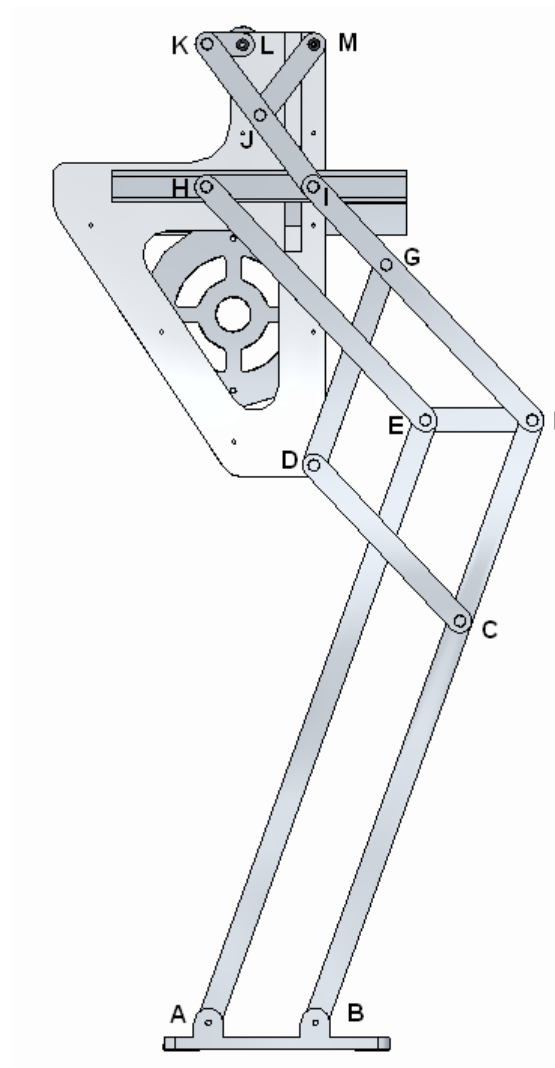


**Figura 6.24:** Aceleraciones punto H eje Y Pasibot original

## 6.2 ESTUDIO DINÁMICO DEL PASIBOT MODIFICADO

Una vez analizado el Pasibot original, procederemos a realizar el estudio dinámico del Pasibot con la modificación de la corredera en “T”. Para ello comenzaremos por analizar las curvas de desplazamientos, posteriormente las velocidades y finalmente las aceleraciones.

Al igual que en el modelo original, en este nuevo modelo también aplicamos la nomenclatura anteriormente descrita:



**Figura 6.25:** Nomenclatura articulaciones Pasibot modificado

A continuación se exponen las gráficas obtenidas con el post procesador.

### 6.2.1 Desplazamientos

La trayectoria del punto D es nula, debido a que se trata del punto de pivote del mecanismo de Pantógrafo.

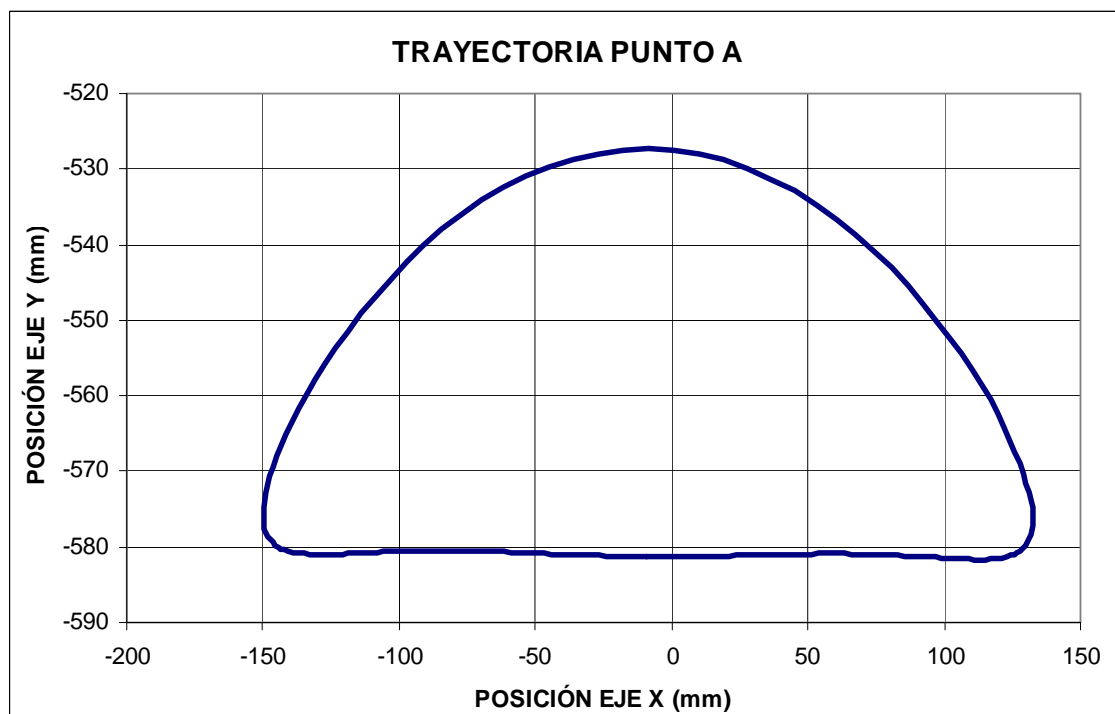
La trayectoria de los puntos L y M es nula, debido a que son los puntos de pivote del mecanismo de Chebyshev.



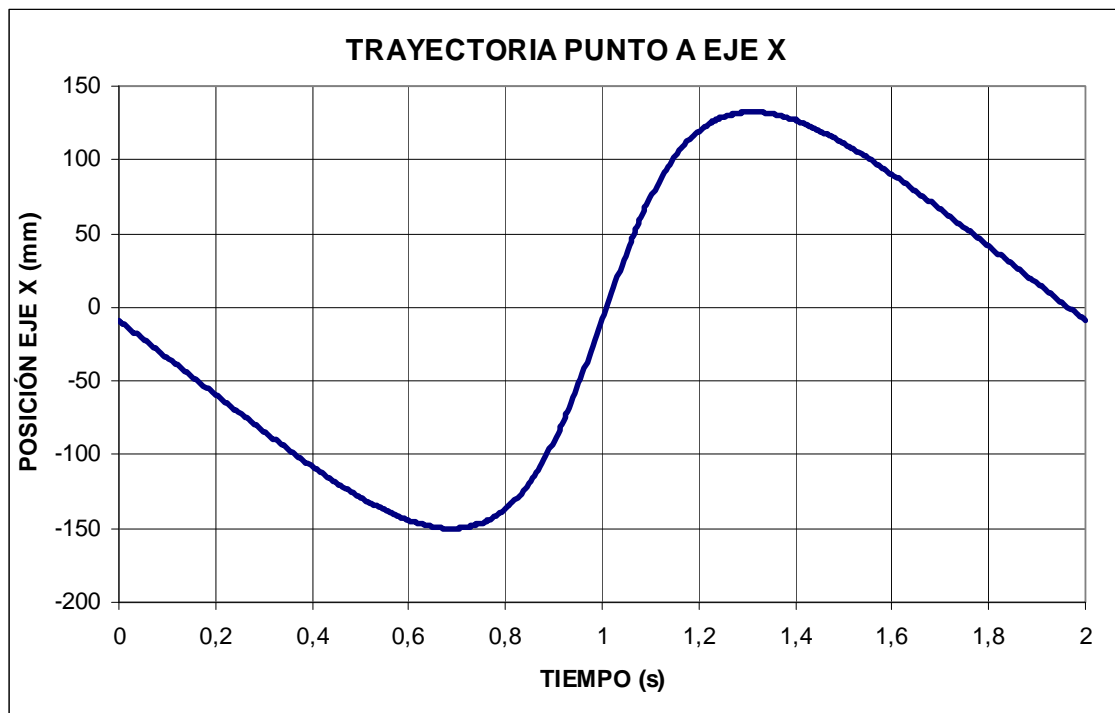
Al igual que con el modelo anterior, los puntos sobre los que se centrará el estudio son los puntos A, E y H, que son sobre los que se obtienen resultados diferentes en uno y otro modelo. Las trayectorias de los demás puntos se pueden consultar en el *Anexo* del documento.

Gráficas de desplazamientos de los puntos de estudio A, E y H:

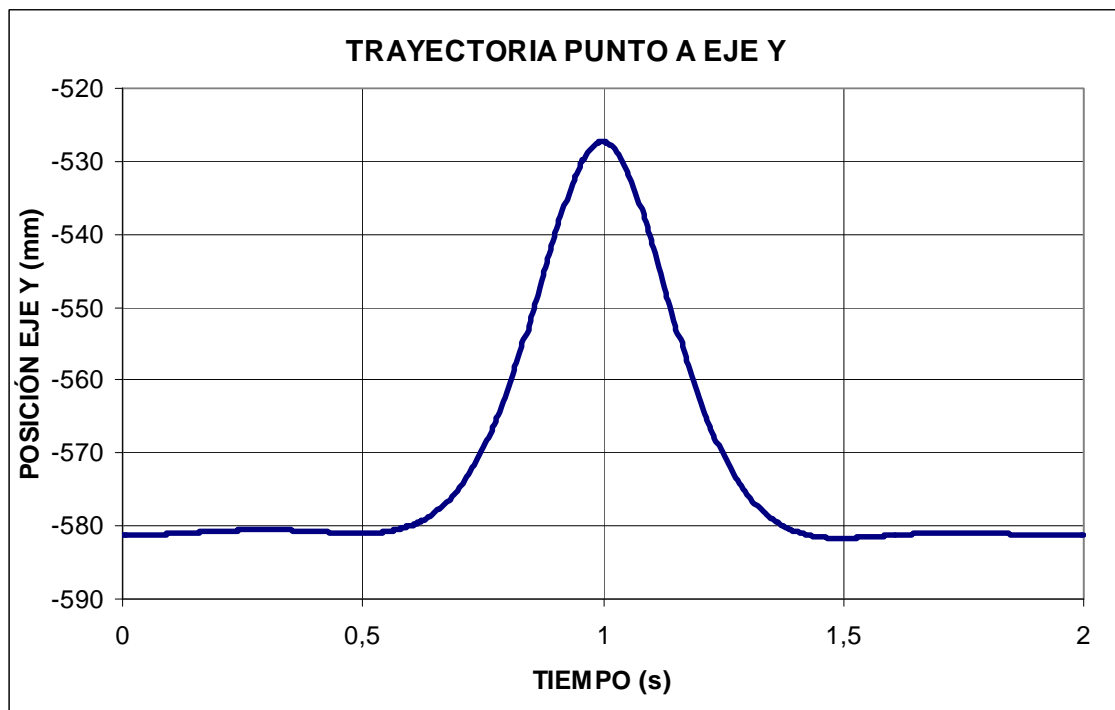
### Punto A



**Figura 6.26:** Trayectoria punto A Pasibot modificado

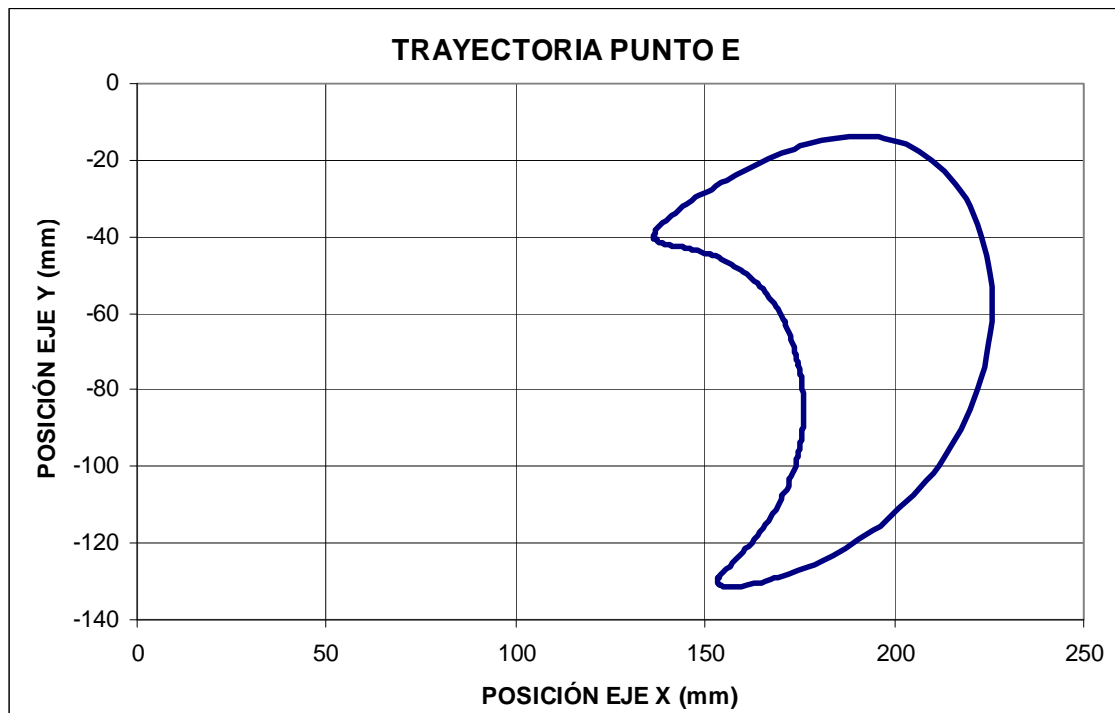


**Figura 6.27:** Trayectoria punto A eje X Pasibot modificado

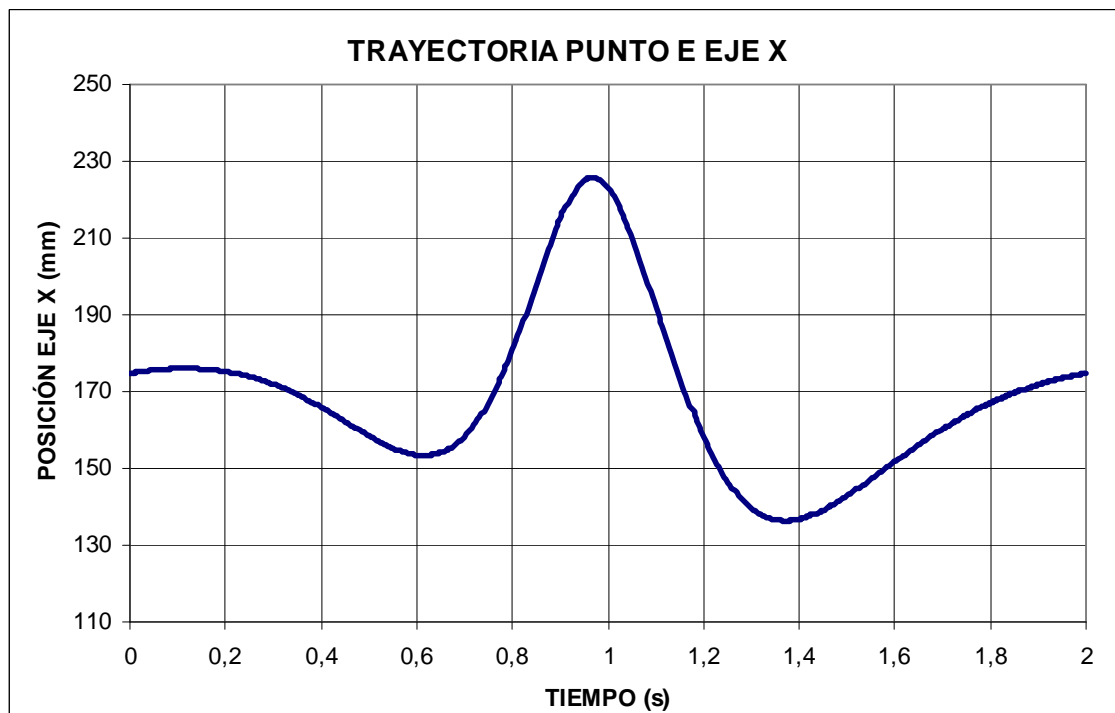


**Figura 6.28:** Trayectoria punto A eje Y Pasibot modificado

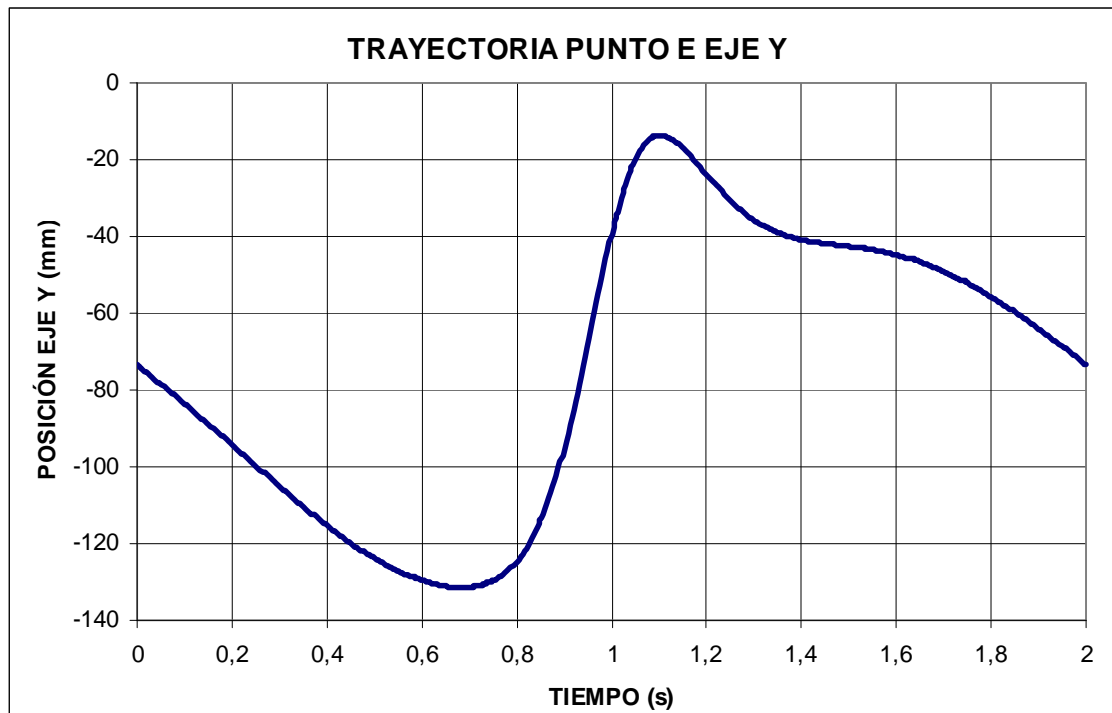
## Punto E



**Figura 6.29:** Trayectoria punto E Pasibot modificado

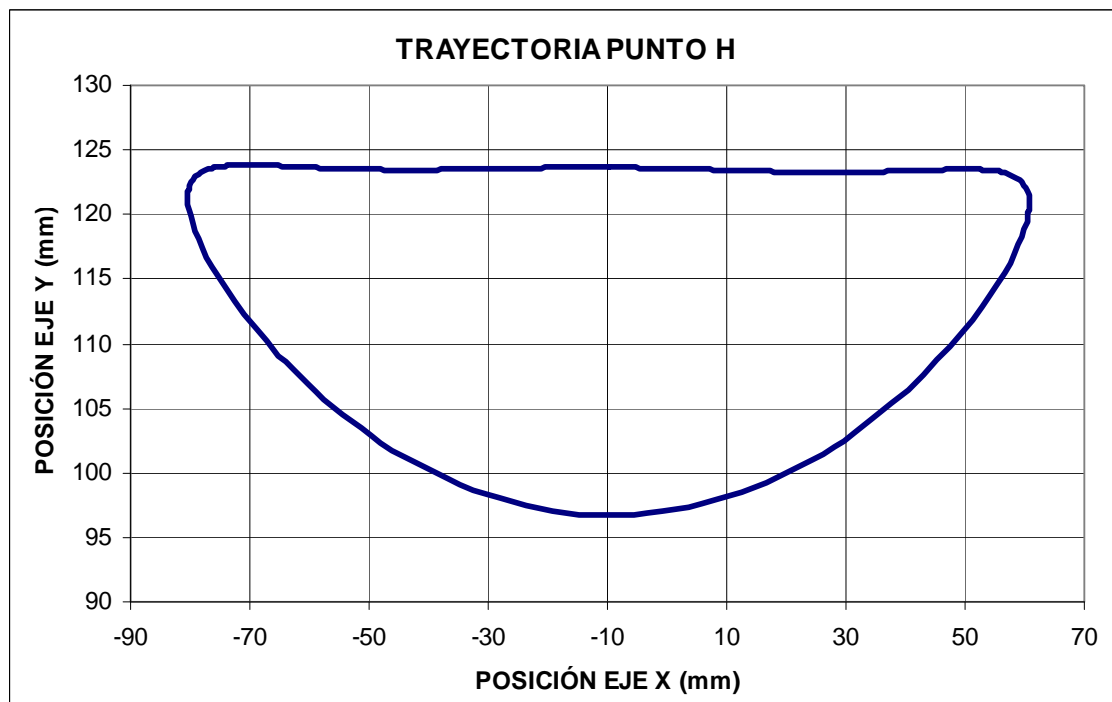


**Figura 6.30:** Trayectoria punto E eje X Pasibot modificado

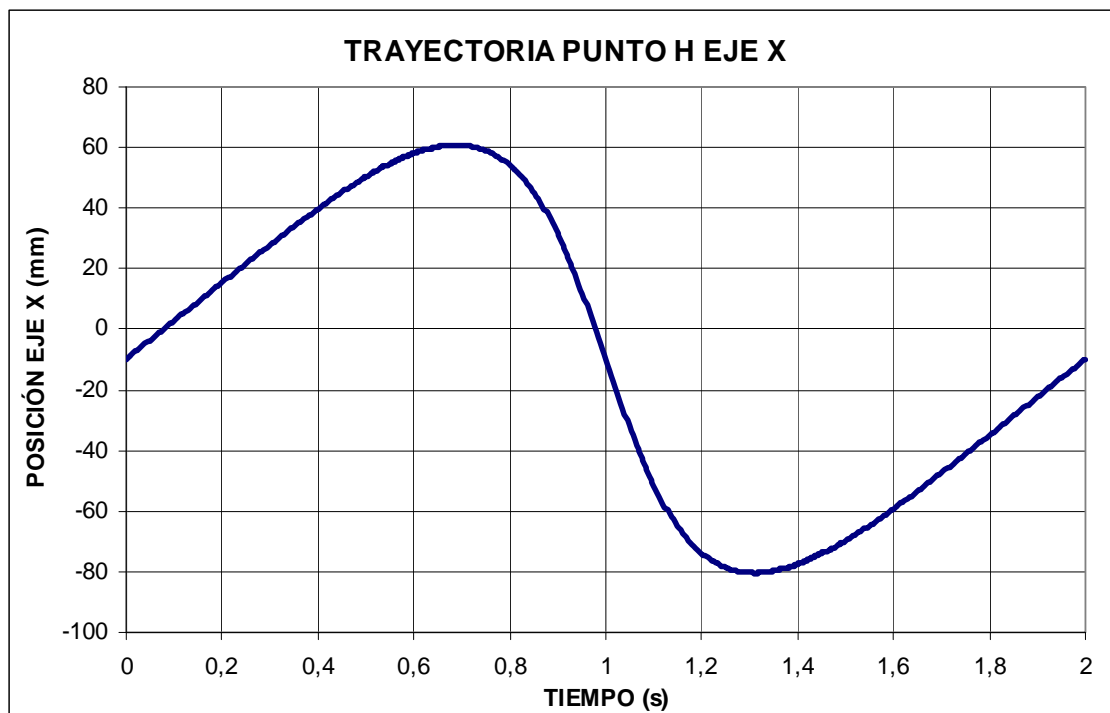


**Figura 6.31:** Trayectoria punto E eje Y Pasibot modificado

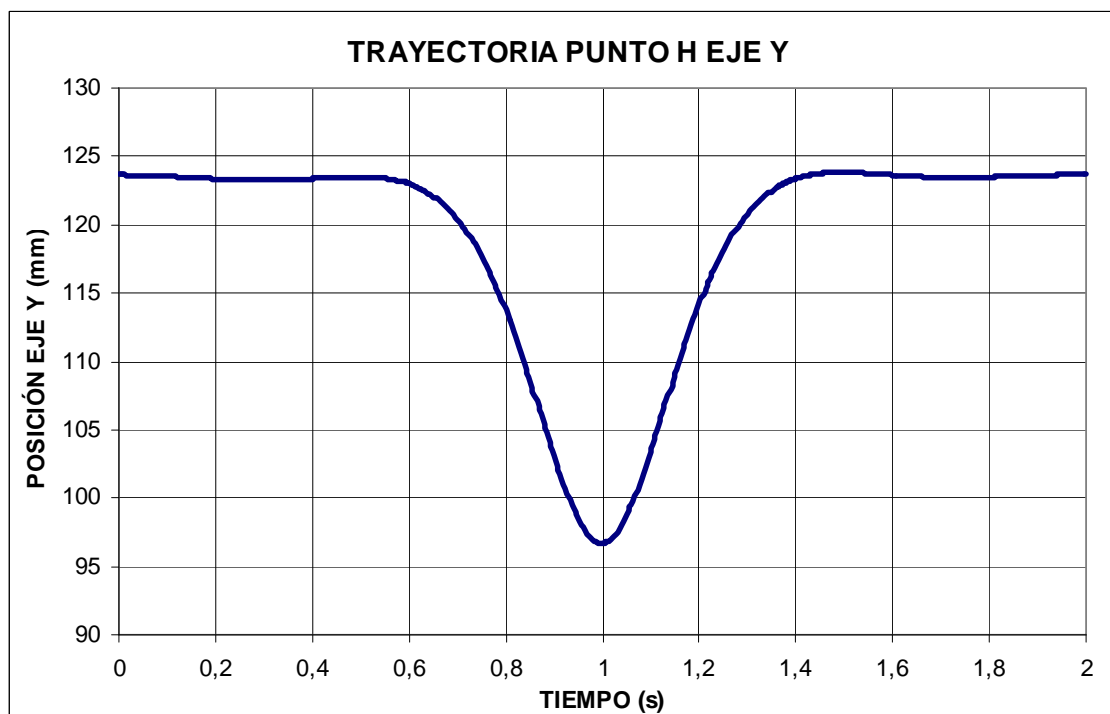
### Punto H



**Figura 6.32:** Trayectoria punto H Pasibot modificado



**Figura 6.33:** Trayectoria punto H eje X Pasibot modificado



**Figura 6.34:** Trayectoria punto H eje Y Pasibot modificado

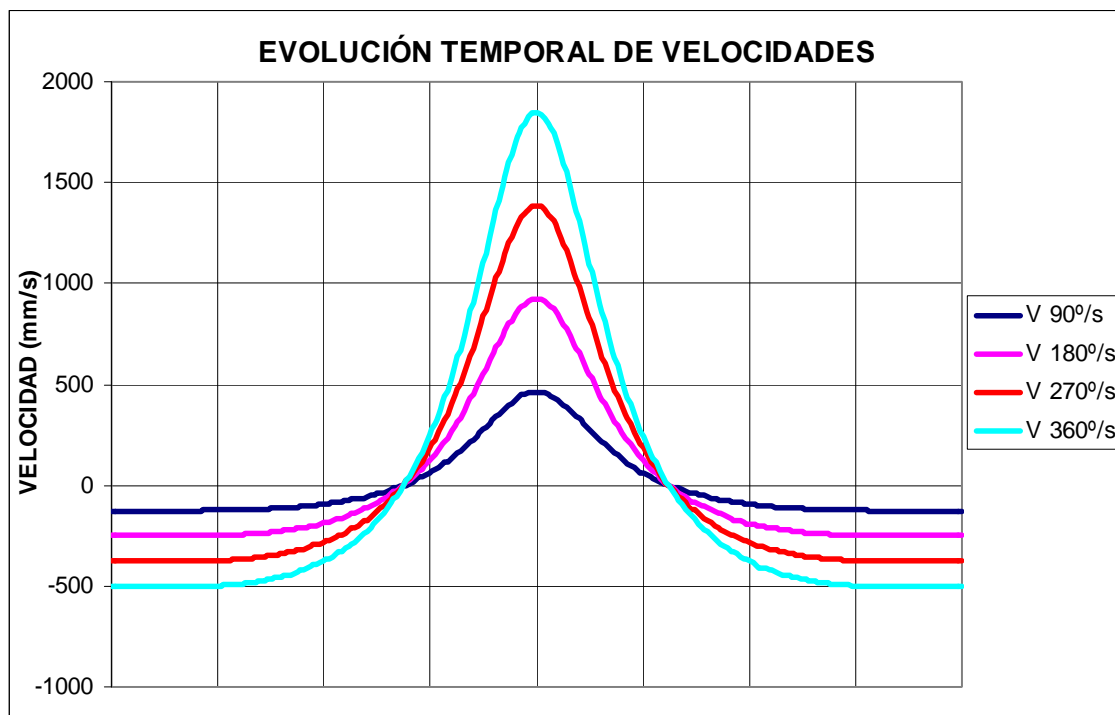
## 6.2.2 Velocidades

Las velocidades para este nuevo modelo son iguales a las del modelo original.

Gráficas de velocidades de todos los puntos del Pasibot para las siguientes velocidades de rotación del motor: 90°/s; 180°/s; 270°/s y 360°/s.

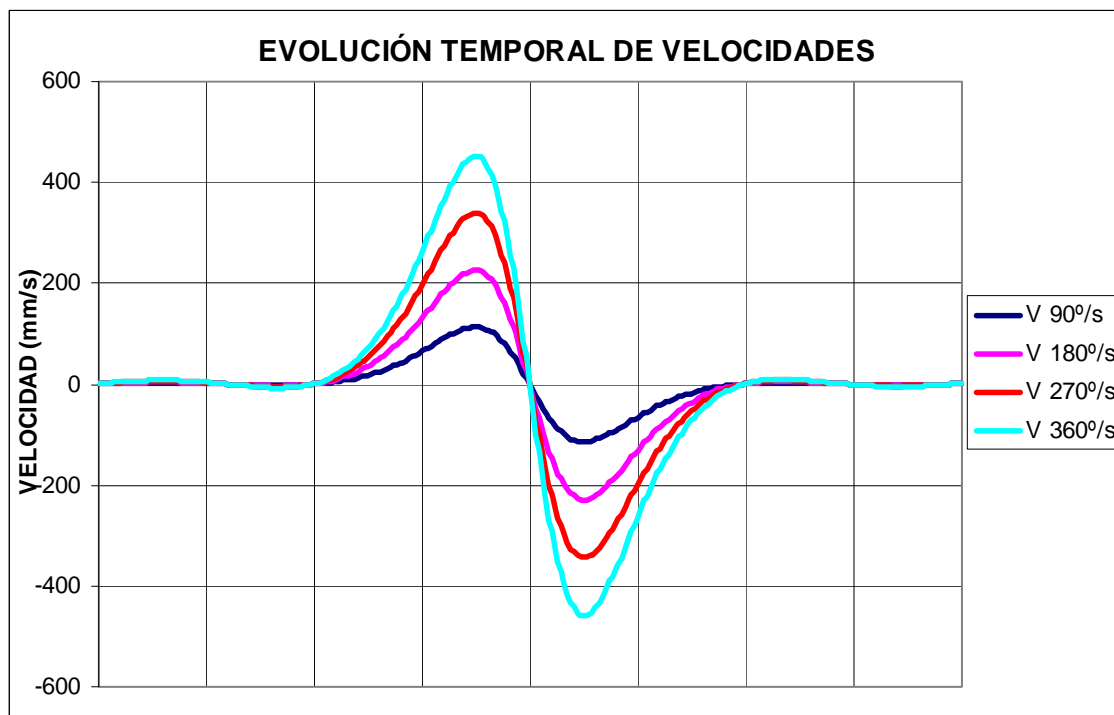
El resto de las gráficas (B, C, D, F, G, I, J, K) se pueden consultar en los *Anexos* del documento, ya que son iguales para ambos mecanismos.

### Punto A eje X



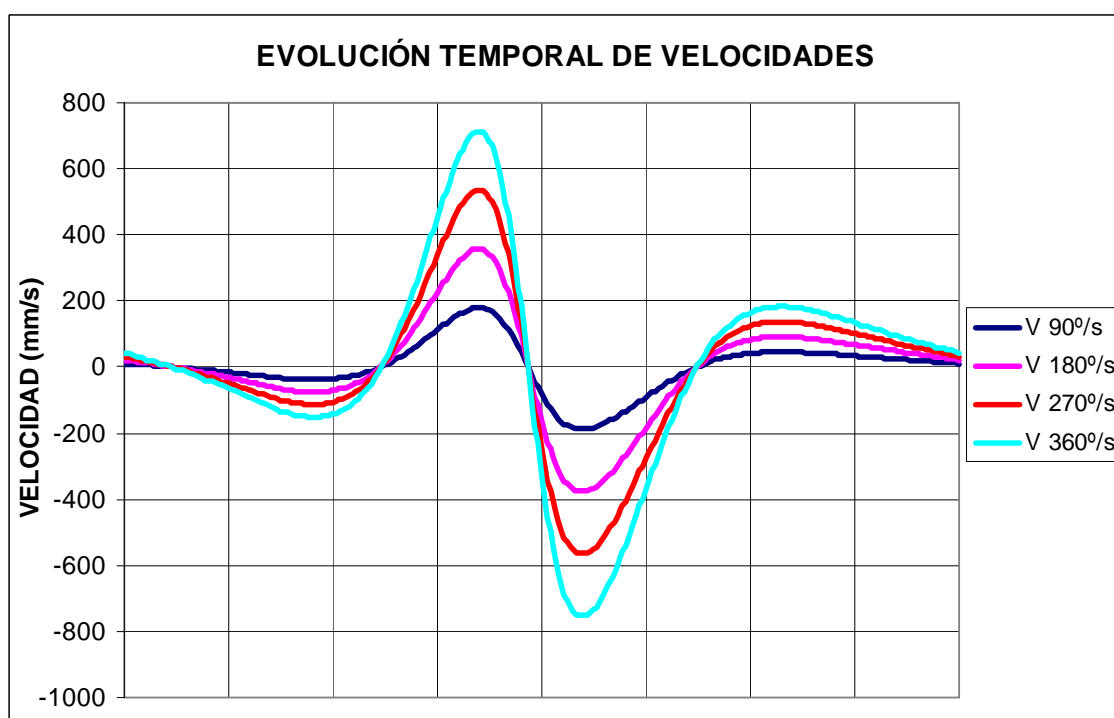
**Figura 6.35:** Velocidades punto A eje X Pasibot modificado

### Punto A eje Y

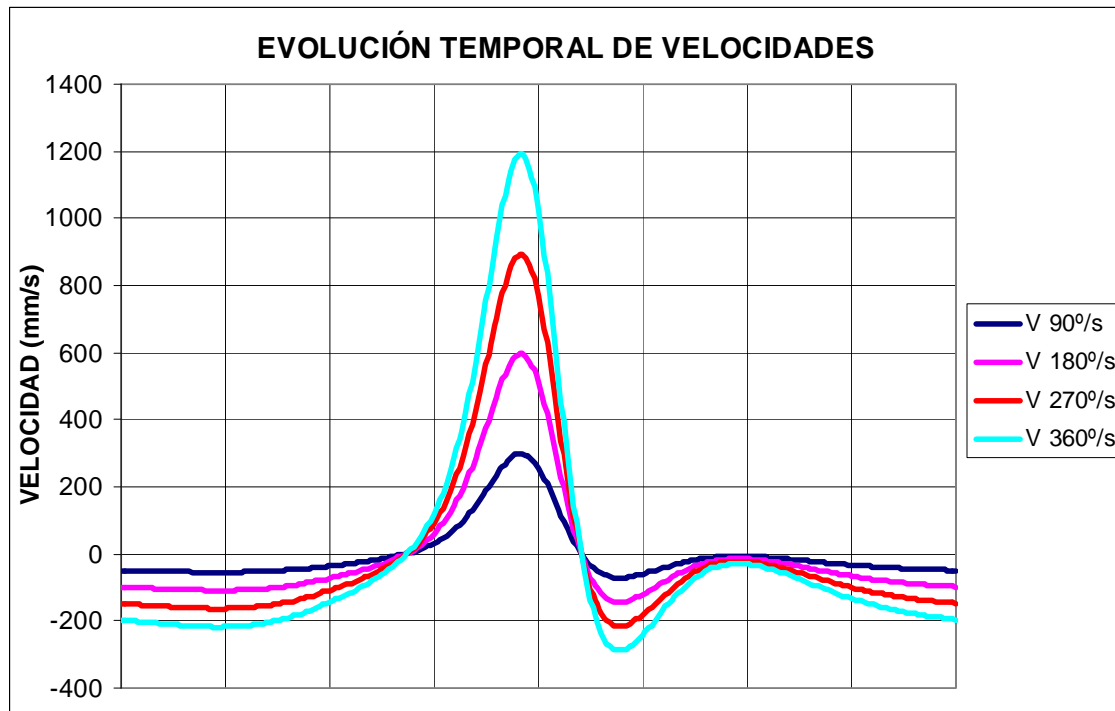


**Figura 6.36:** Velocidades punto A eje Y Pasibot modificado

### Punto E eje X

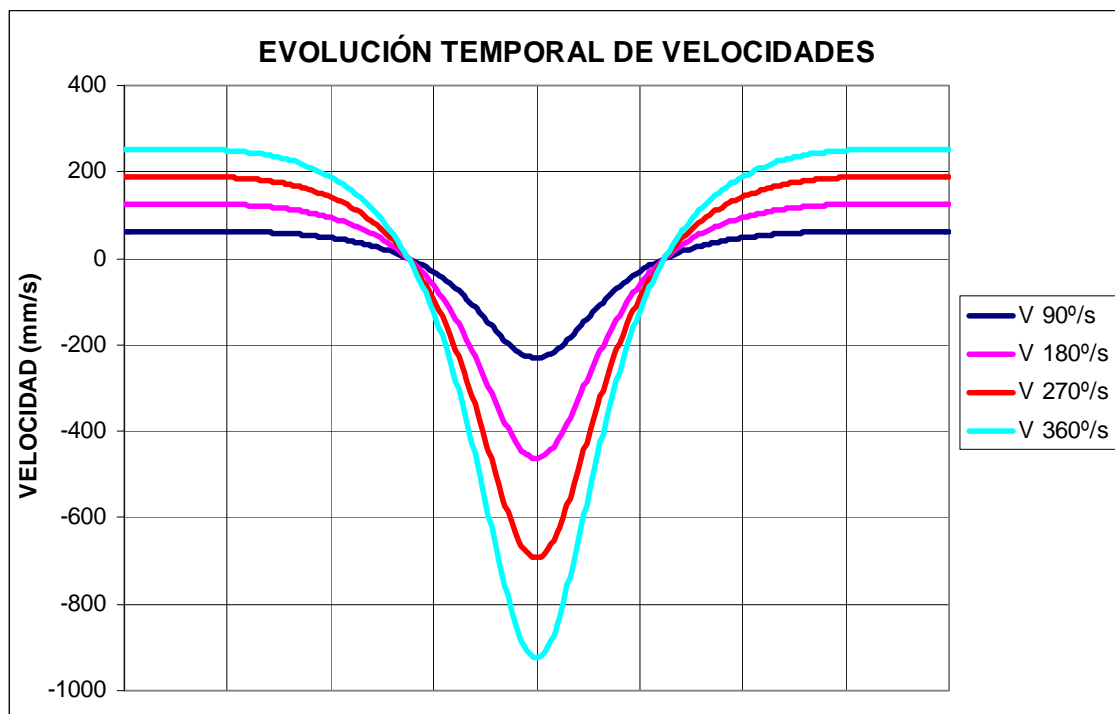


**Figura 6.37:** Velocidades punto E eje X Pasibot modificado  
**Punto E eje Y**



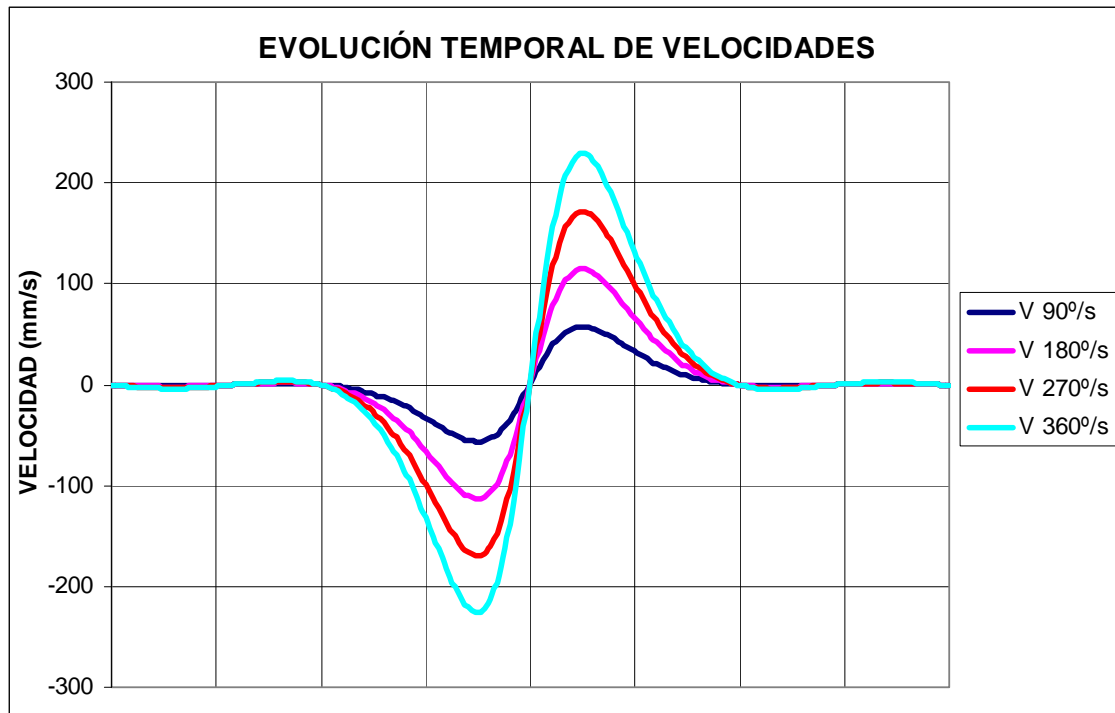
**Figura 6.38:** Velocidades punto E eje Y Pasibot modificado

**Punto H eje X**





**Figura 6.39:** Velocidades punto H eje X Pasibot modificado  
**Punto H eje Y**



**Figura 6.40:** Velocidades punto H eje Y Pasibot modificado

### 6.2.3 Aceleraciones

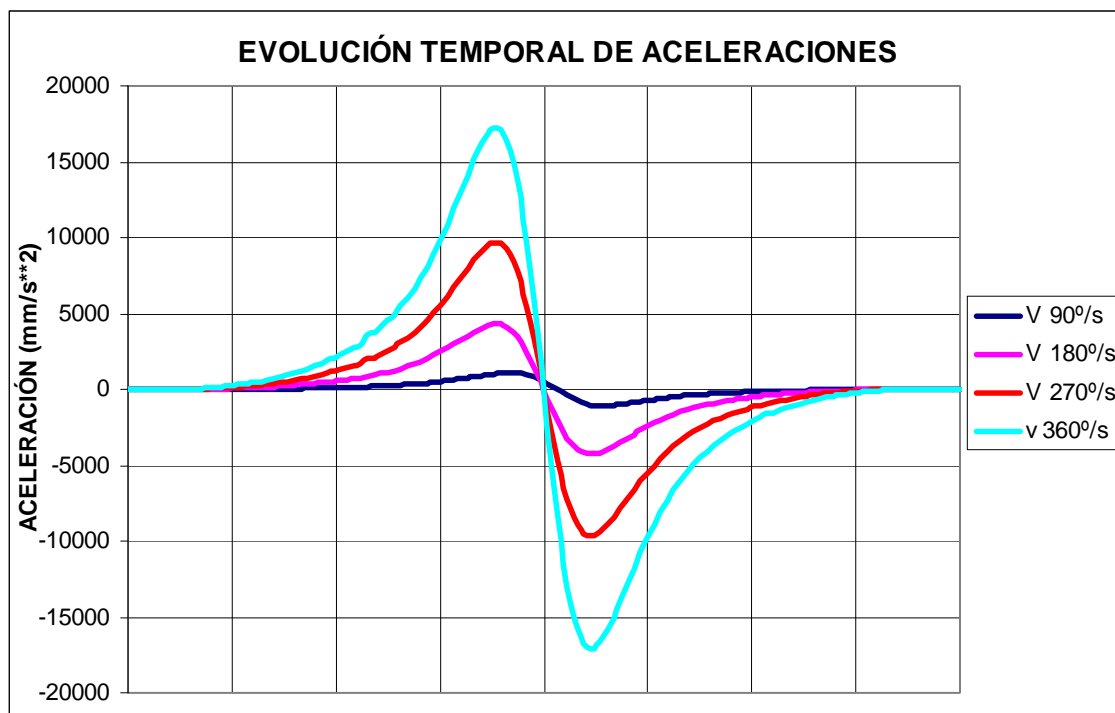
La aceleración del punto D es nula, debido a que se trata del punto de pivotaje del mecanismo de Pantógrafo.

Las aceleraciones de los puntos L y M son nulas, debido a que son los puntos de pivotaje del mecanismo de Chebyshev.

Gráficas de aceleraciones de todos los puntos del Pasibot para las siguientes velocidades de rotación del motor: 90°/s; 180°/s; 270°/s y 360°/s.

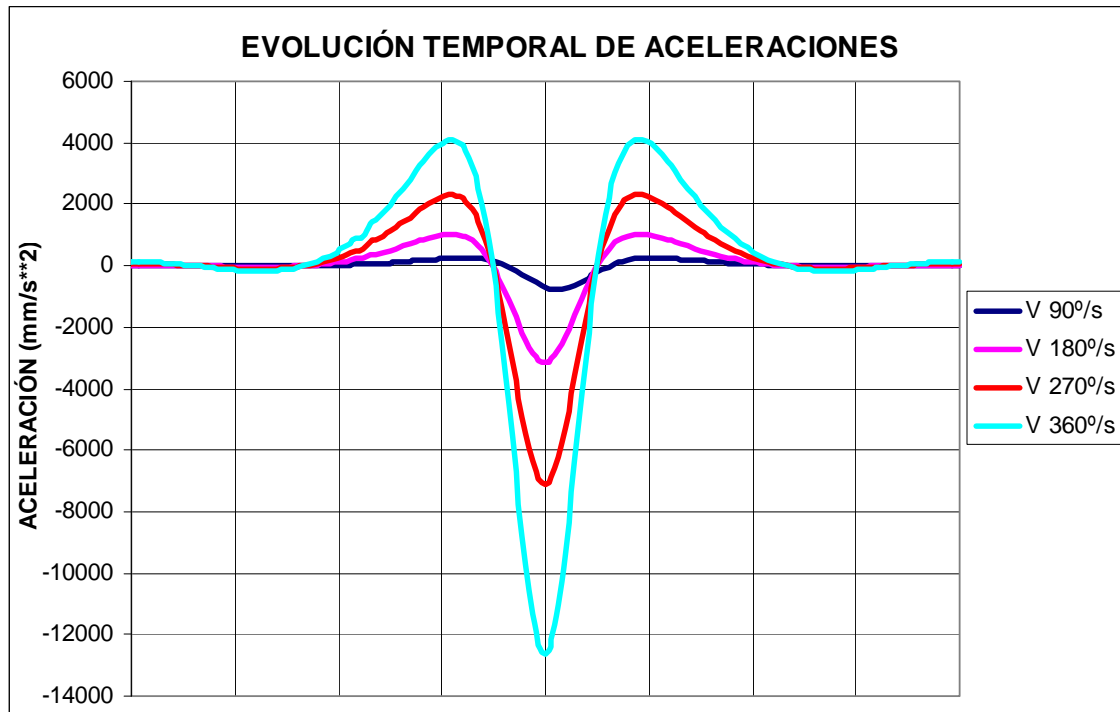
El resto de las gráficas (B, C, D, F, G, I, J, K) se pueden consultar en los Anexos del documento, ya que son iguales para ambos mecanismos.

#### Punto A eje X



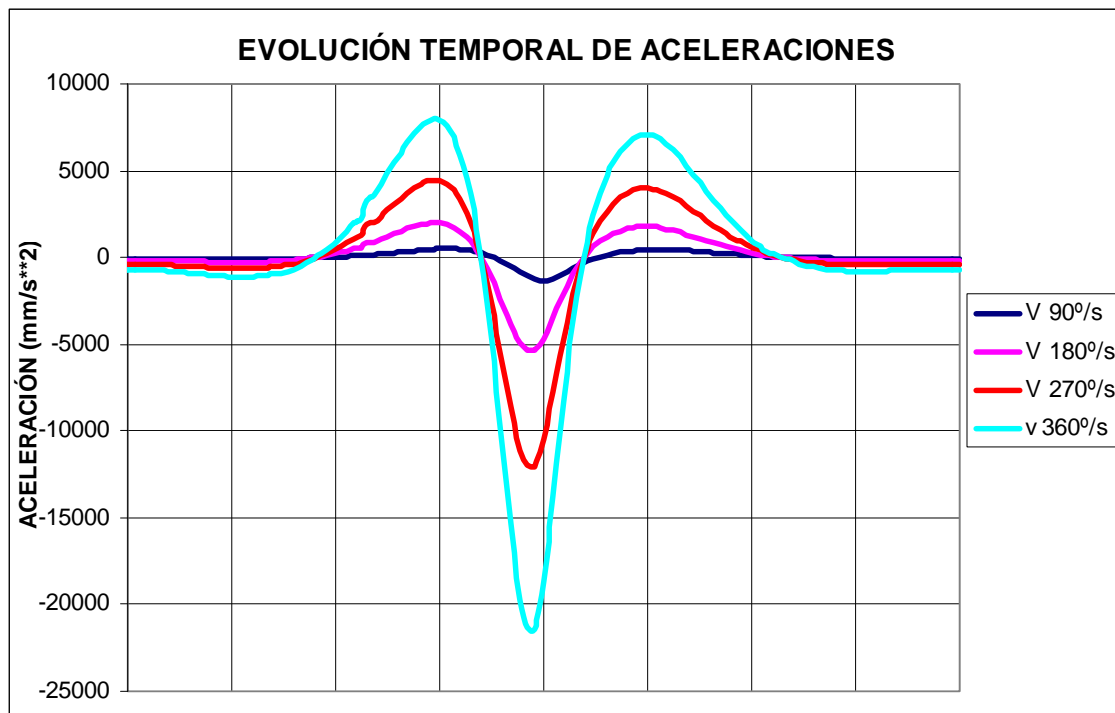
**Figura 6.41:** Aceleraciones punto A eje X Pasibot modificado

### Punto A eje Y

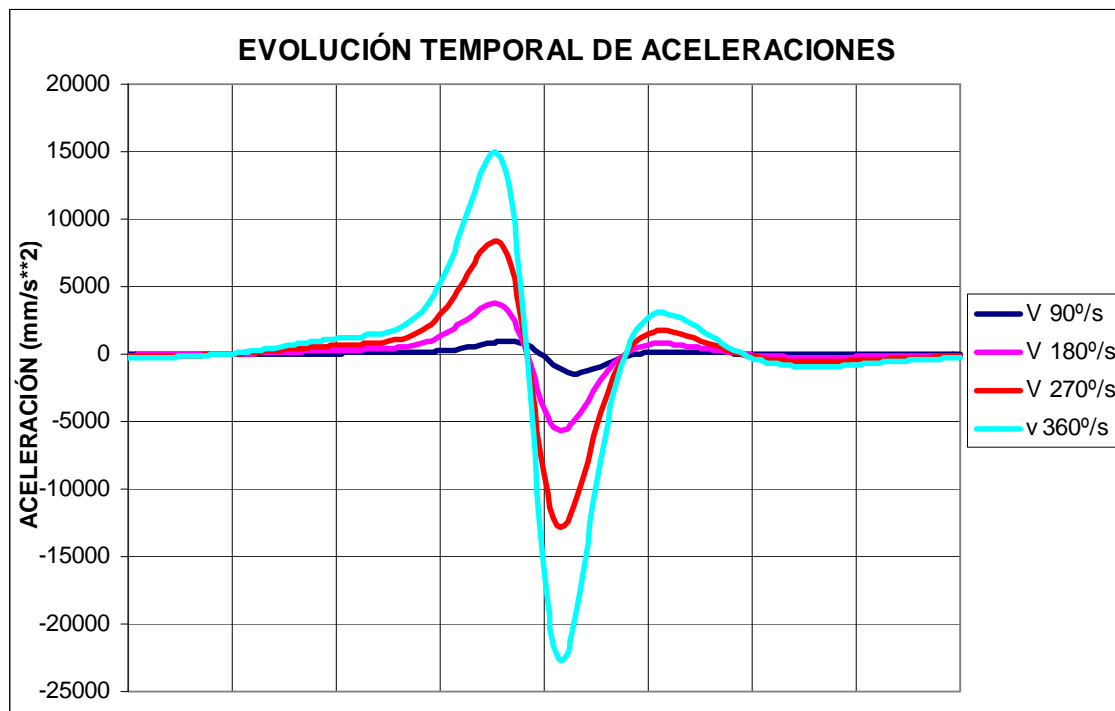


**Figura 6.42:** Aceleraciones punto A eje Y Pasibot modificado

### Punto E eje X

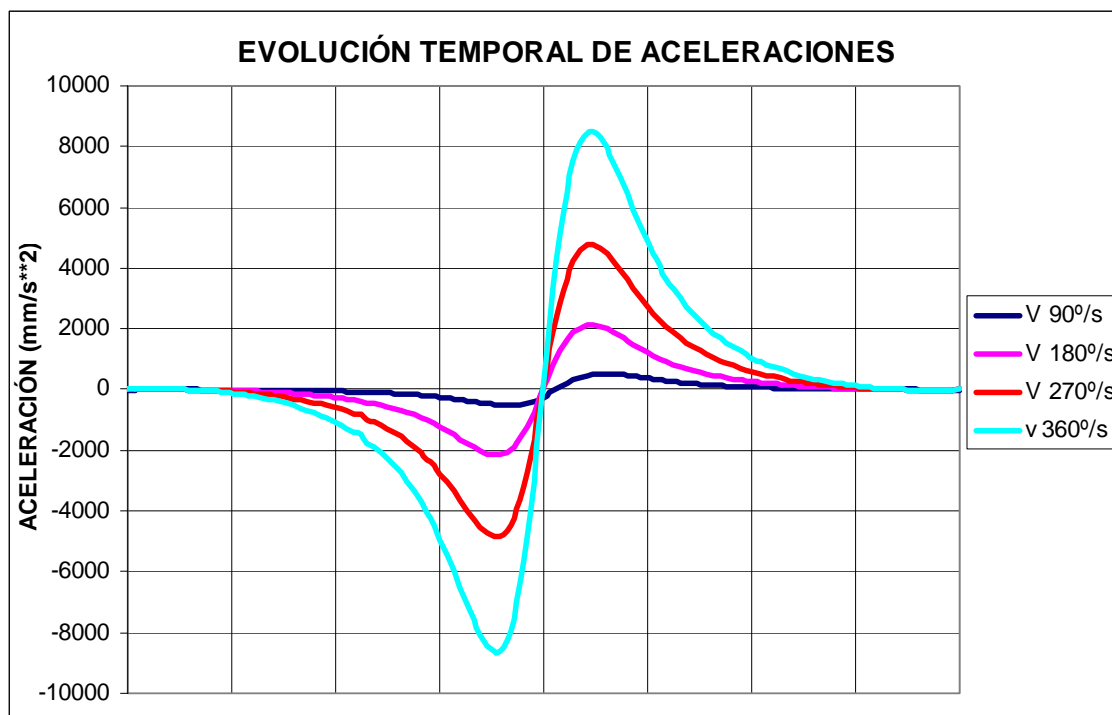


**Figura 6.43:** Aceleraciones punto E eje X Pasibot modificado  
**Punto E eje Y**

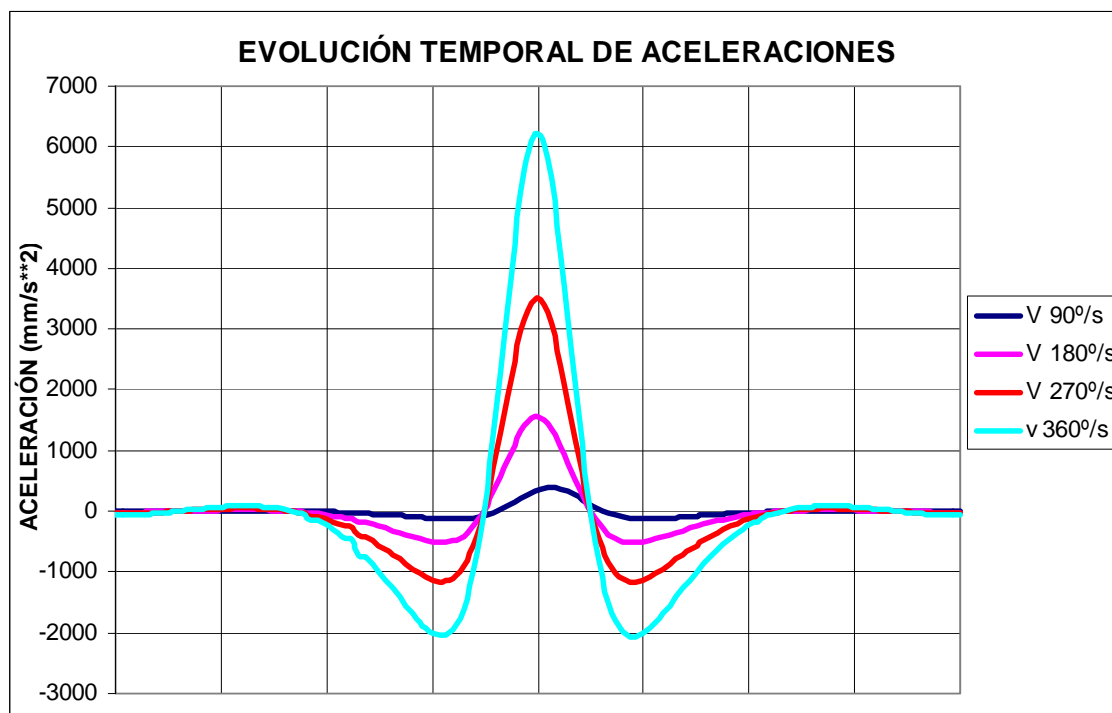


**Figura 6.44:** Aceleraciones punto E eje Y Pasibot modificado

### **Punto H eje X**



**Figura 6.45:** Aceleraciones punto H eje X Pasibot modificado  
**Punto H eje Y**



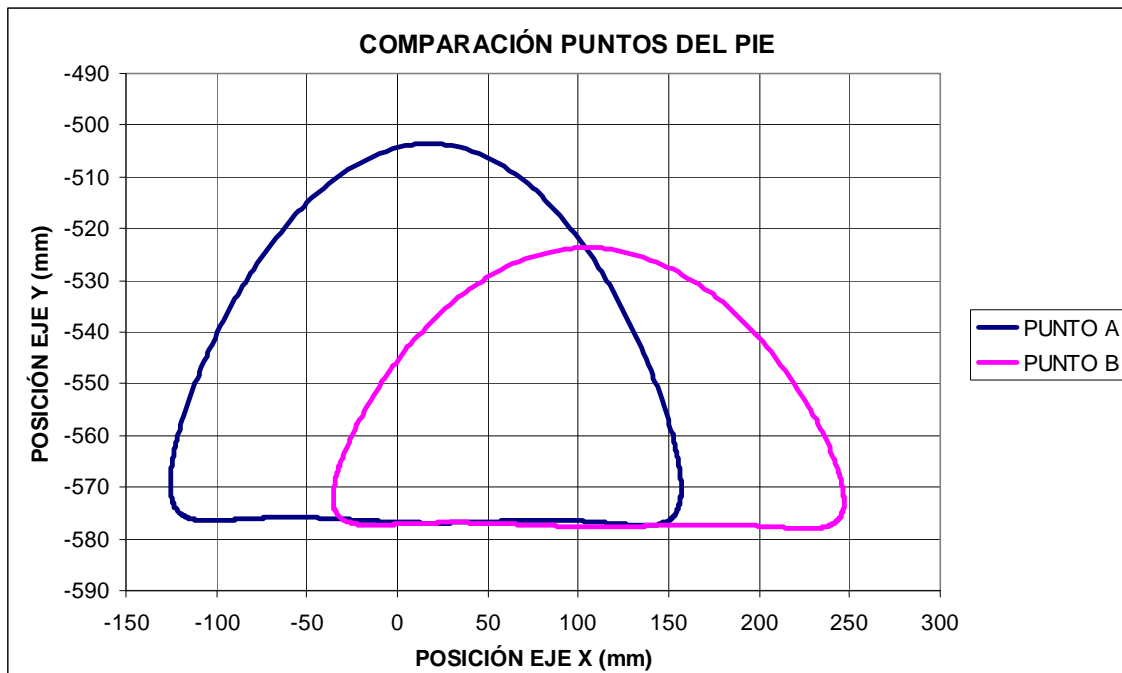
**Figura 6.46:** Aceleraciones punto H eje Y Pasibot modificado



### **6.3 COMPARACIÓN DE PUNTOS DEL PASIBOT ORIGINAL**

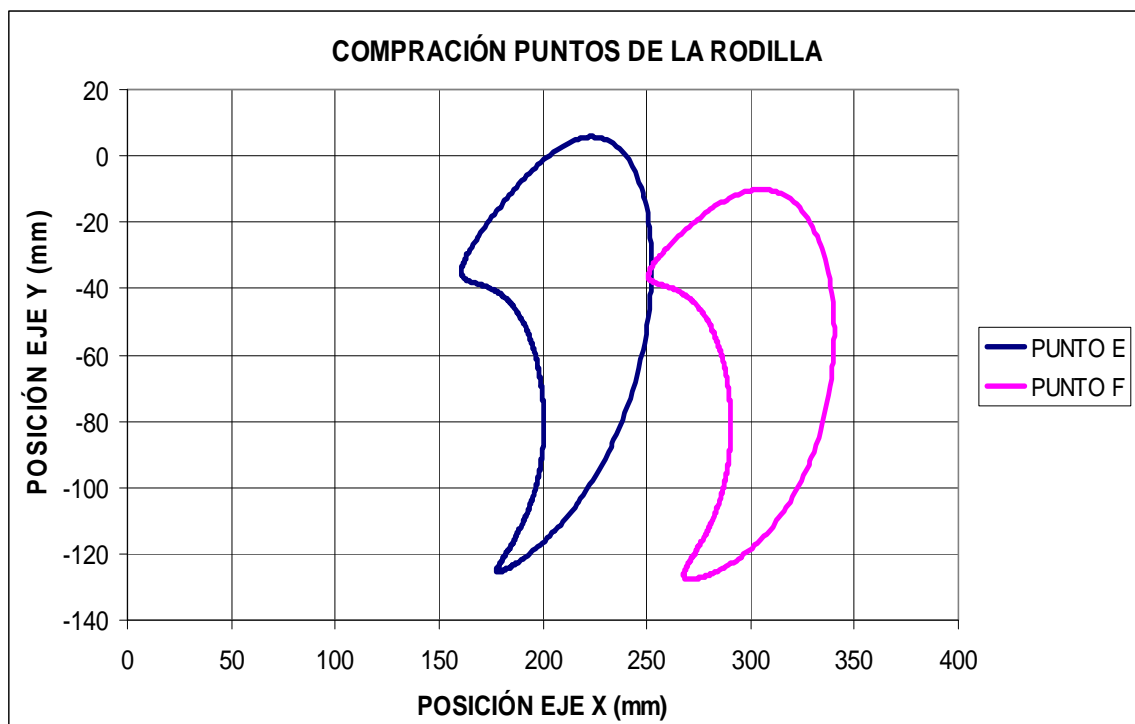
A continuación se compararán las trayectorias de los puntos que están paralelos en el mecanismo, para ver como afecta a sus trayectorias el uso del mecanismo de corredera original.

#### **Puntos A y B (puntos del pie)**

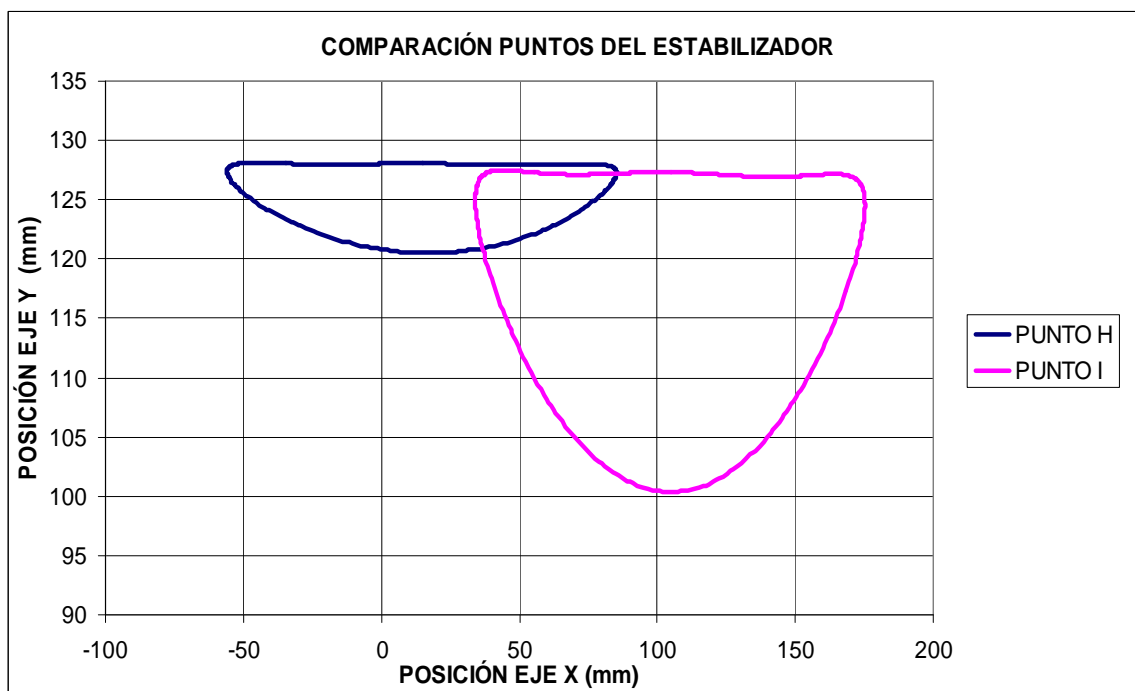


**Figura 6.47:** Comparación puntos A y B modelo original

### Puntos E y F (puntos de la rodilla)



#### Puntos H e I (puntos del estabilizador)

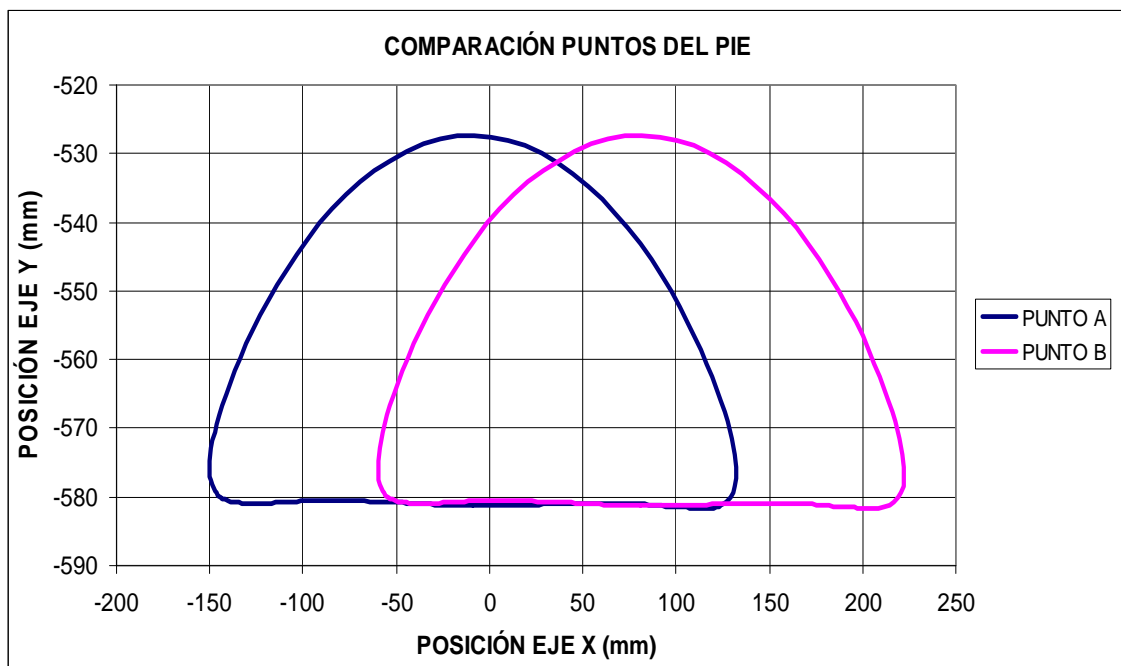


### **6.4 COMPARACIÓN DE PUNTOS DEL PASIBOT MODIFICADO**



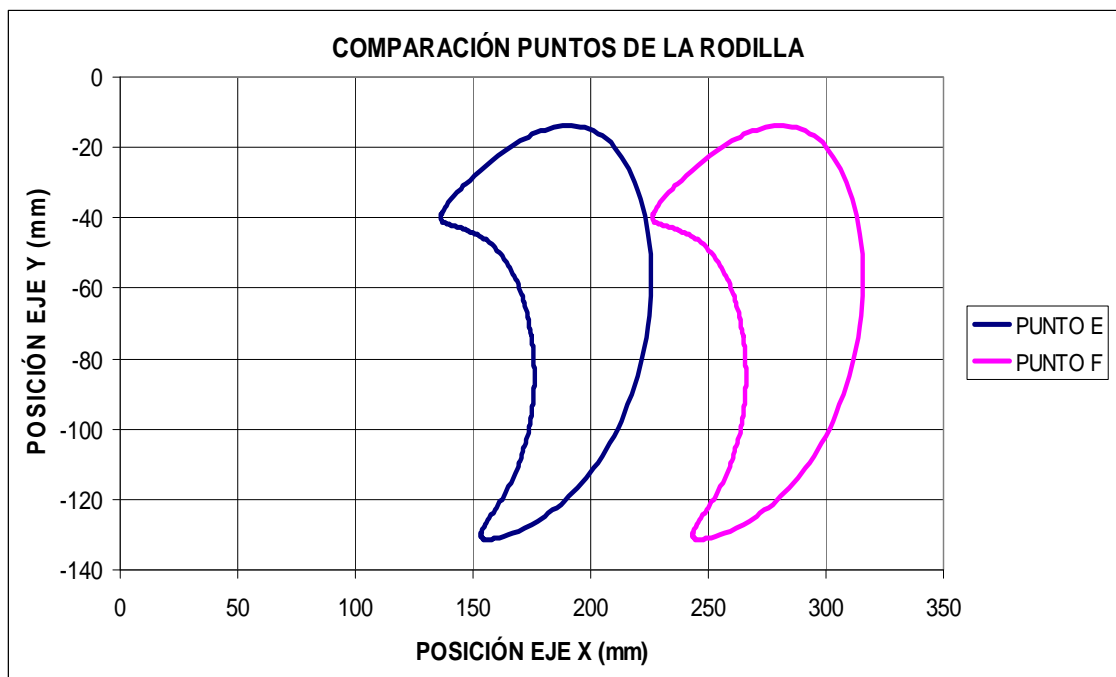
A continuación se compararán las trayectorias de los puntos que están paralelos en el mecanismo, para ver como afecta a sus trayectorias el uso del mecanismo de corredera original.

### Puntos A y B (puntos del pie)



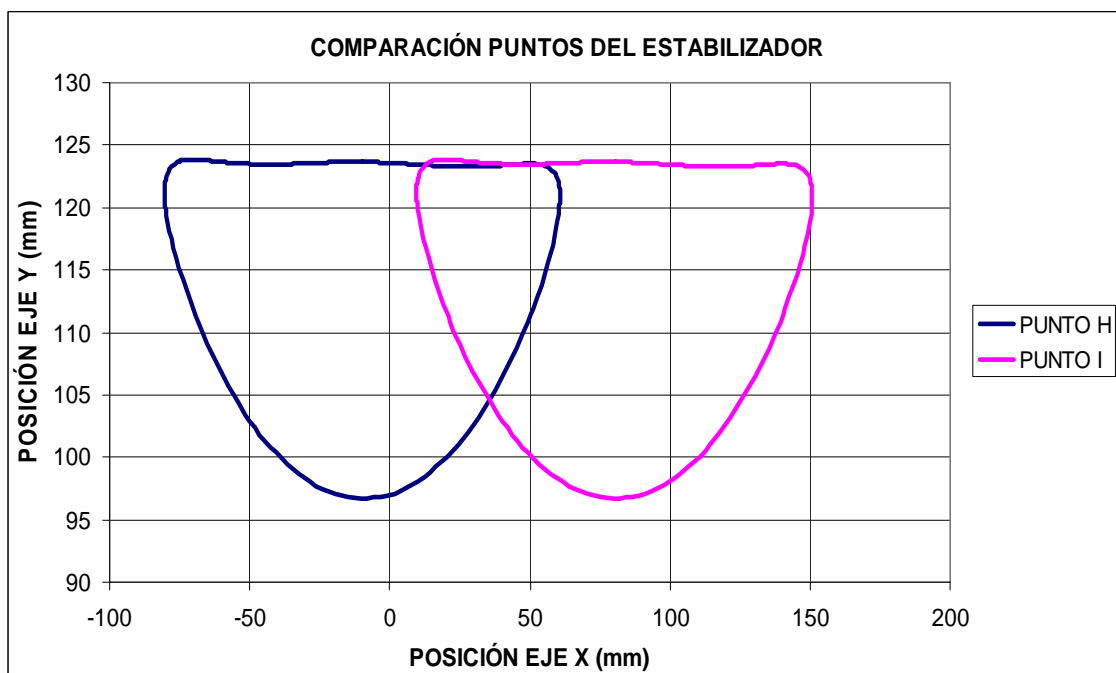
**Figura 6.50:** Comparación puntos A y B modelo modificado

### Puntos E y F (puntos de la rodilla)



**Figura 6.51:** Comparación puntos E y F modelo modificado

### Puntos H e I (puntos del estabilizador)



**Figura 6.52:** Comparación puntos H e I modelo modificado



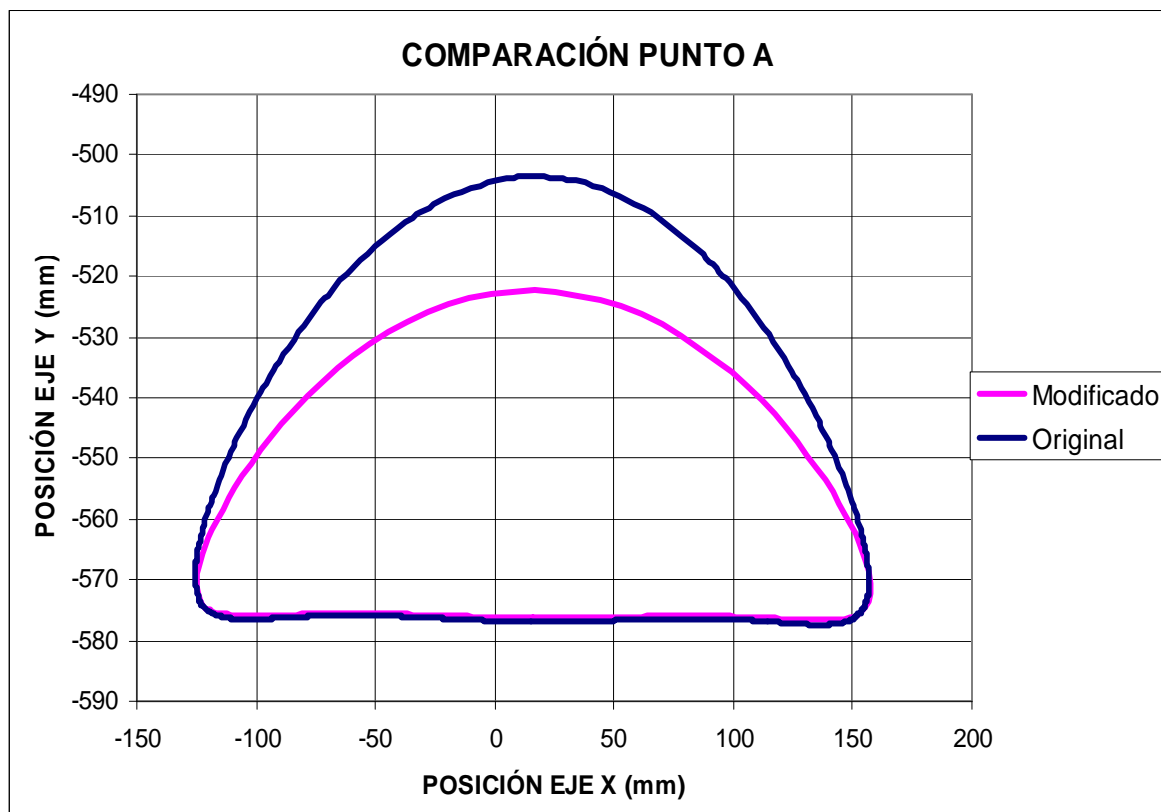
Comparando ambos puntos en el *modelo original*, se observa que las trayectorias de los puntos que parecen estar paralelos no describen el mismo dibujo. Esto nos lleva a pensar que en realidad estos puntos que deberían permanecer paralelos y describir por lo tanto la misma trayectoria en realidad no lo son. Se observa en las gráficas, que describen la misma trayectoria durante un cierto tiempo, pero llega un momento en el cual estas trayectorias se desvinculan y cada punto realiza un trazo diferente. Este instante es en el cual el estabilizador se inclina haciendo perder el paralelismo de ambos puntos, y con ello la estabilidad del robot.

Por el contrario observando las gráficas de las trayectorias de los puntos del modelo modificado, se observa que son prácticamente idénticas. Por lo tanto se puede asegurar que el paralelismo entre puntos se mantiene a lo largo de todo el ciclo del paso, manteniendo a su vez la estabilidad y equilibrio del robot.

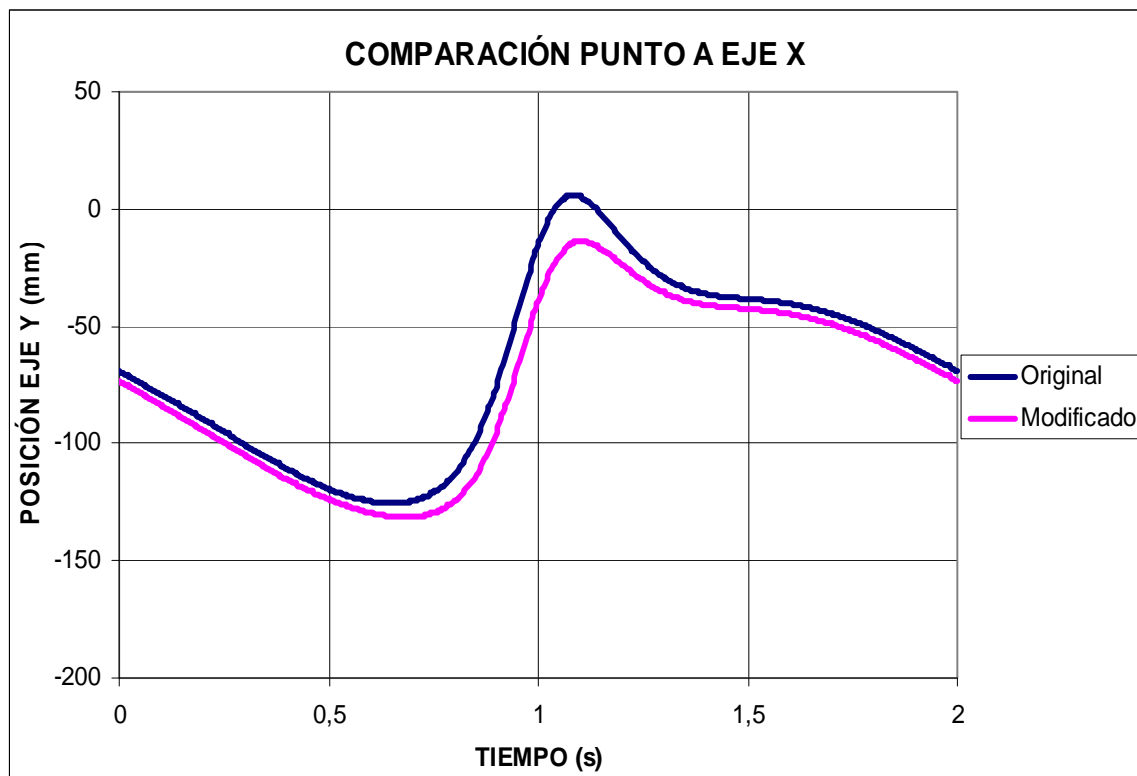
## 6.5 COMPARACIÓN DE PUNTOS ENTRE EL MODELO ORIGINAL Y MODIFICADO

Comparando ambos modelos se pueden sacar algunas conclusiones importantes. Para tener una mayor constancia visual, se compararán las trayectorias de ambos modelos para un mismo punto.

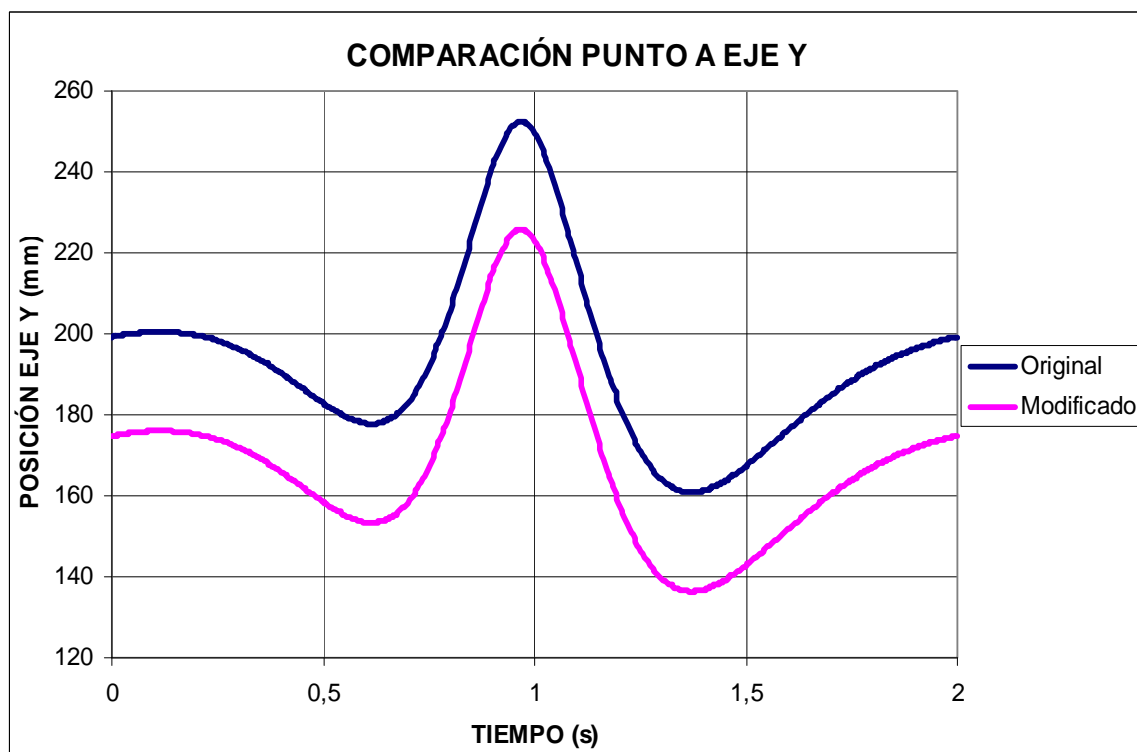
### Punto A



**Figura 6.53:** Comparación del punto A entre ambos modelos

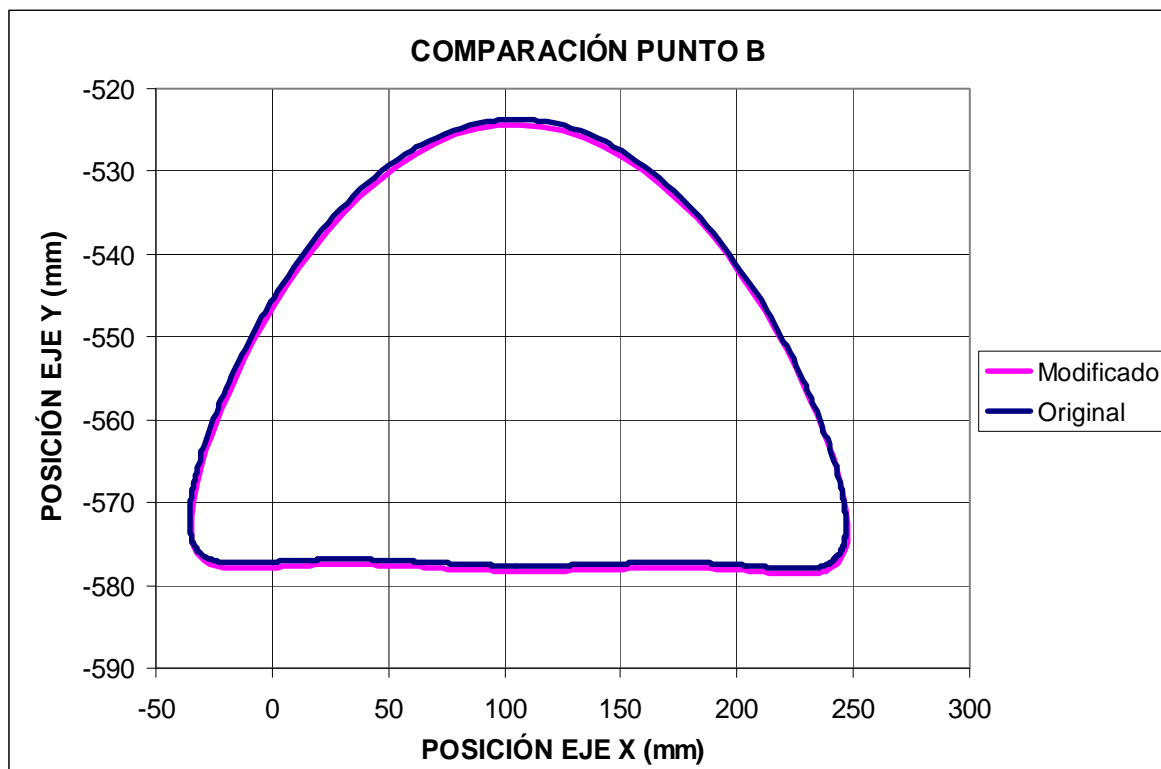


**Figura 6.54:** Comparación del punto A eje X entre ambos modelos



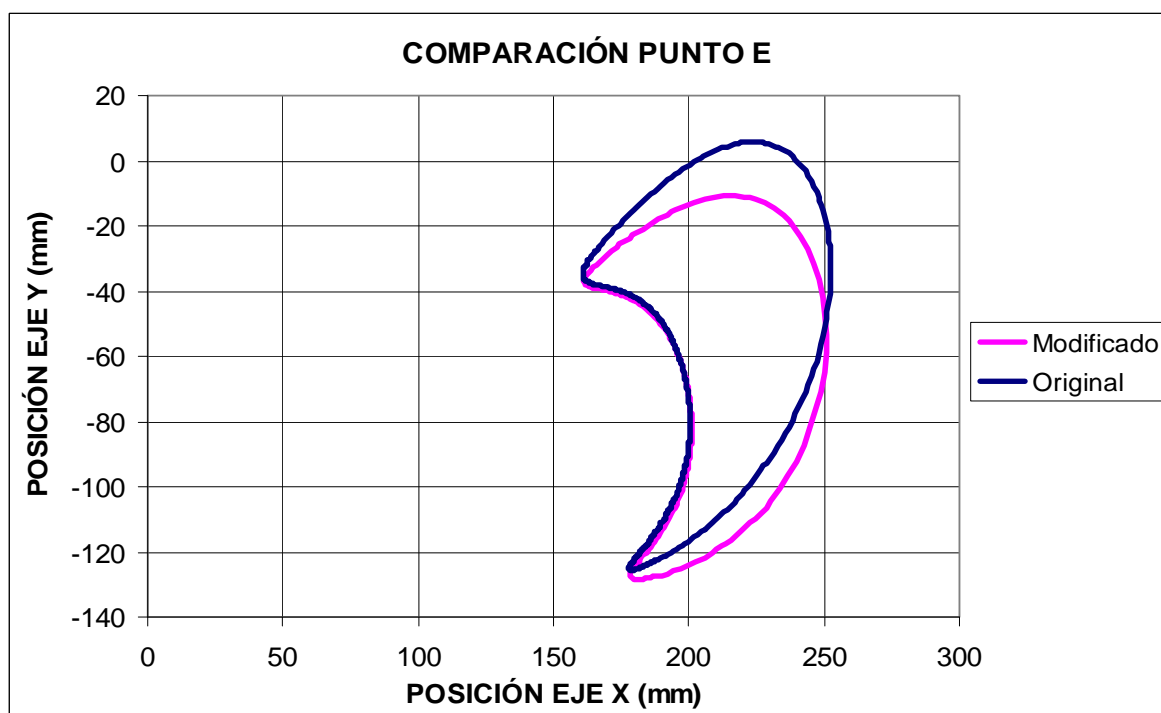
**Figura 6.55:** Comparación del punto A eje Y entre ambos modelos

### Punto B

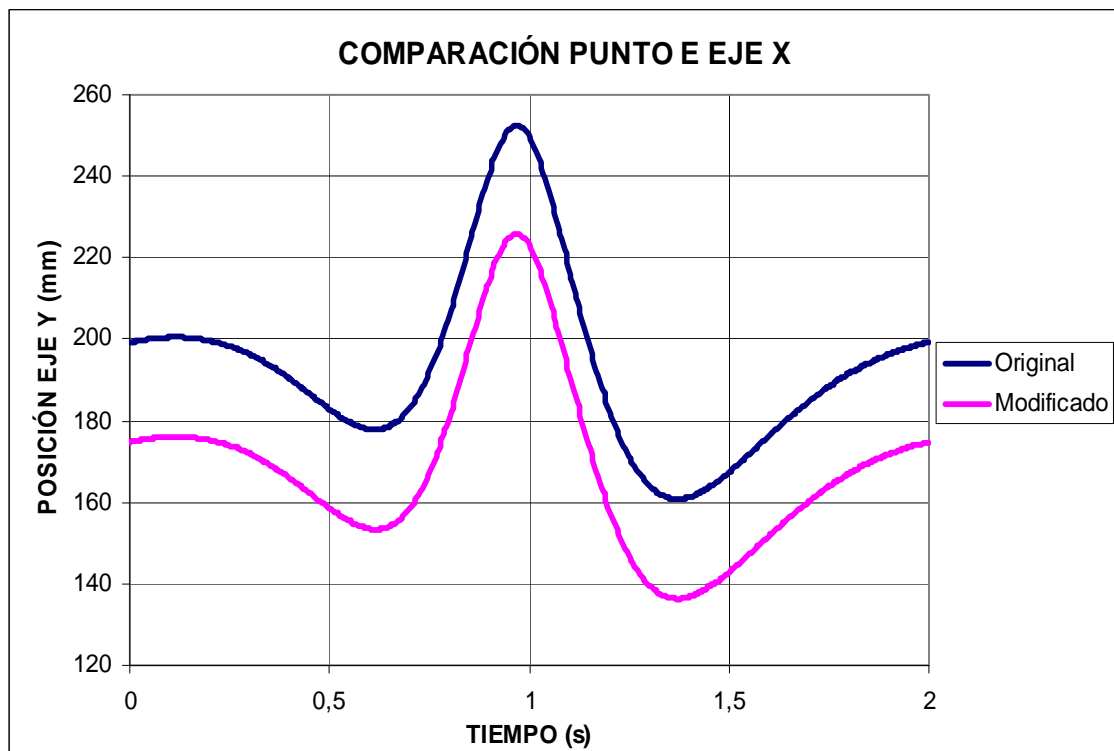


**Figura 6.56:** Comparación del punto B entre ambos modelos

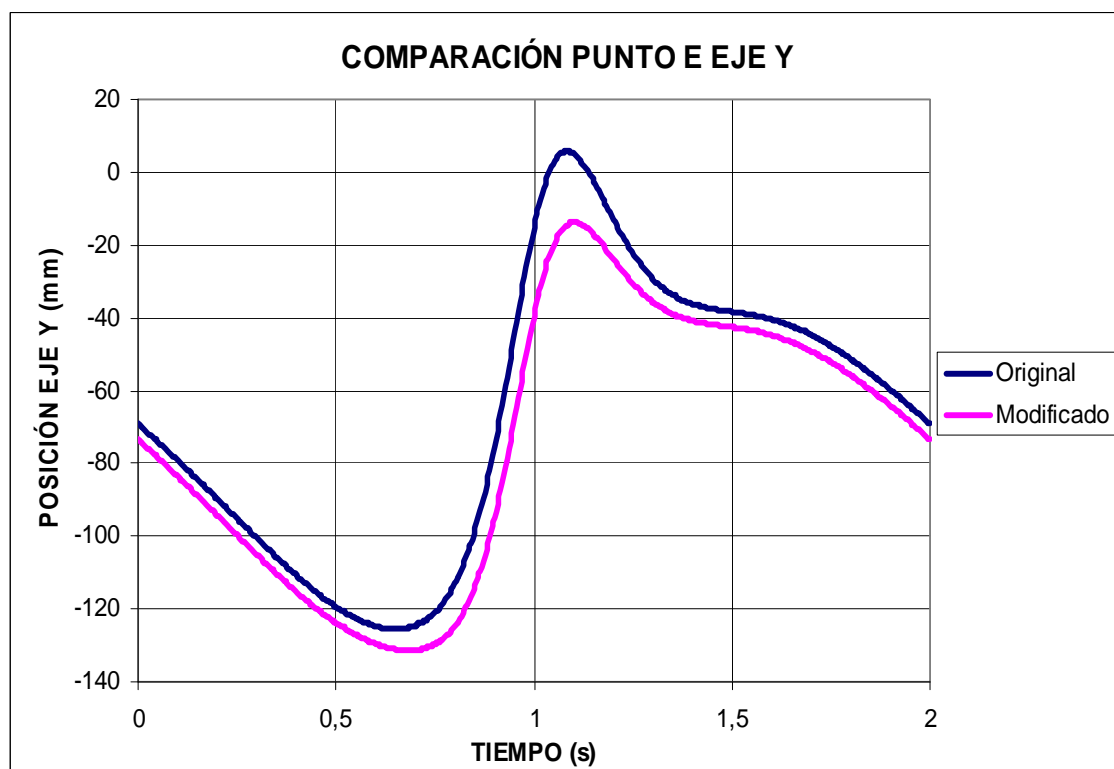
### Punto E



**Figura 6.57:** Comparación del punto E entre ambos modelos

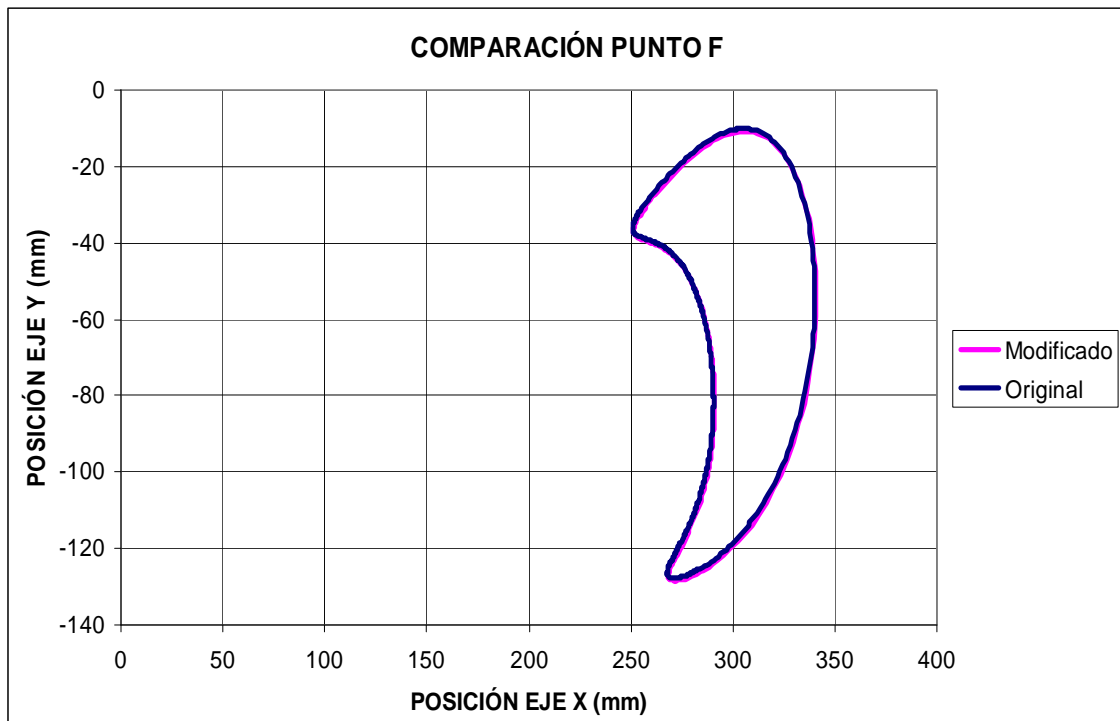


**Figura 6.58:** Comparación del punto E eje X entre ambos modelos



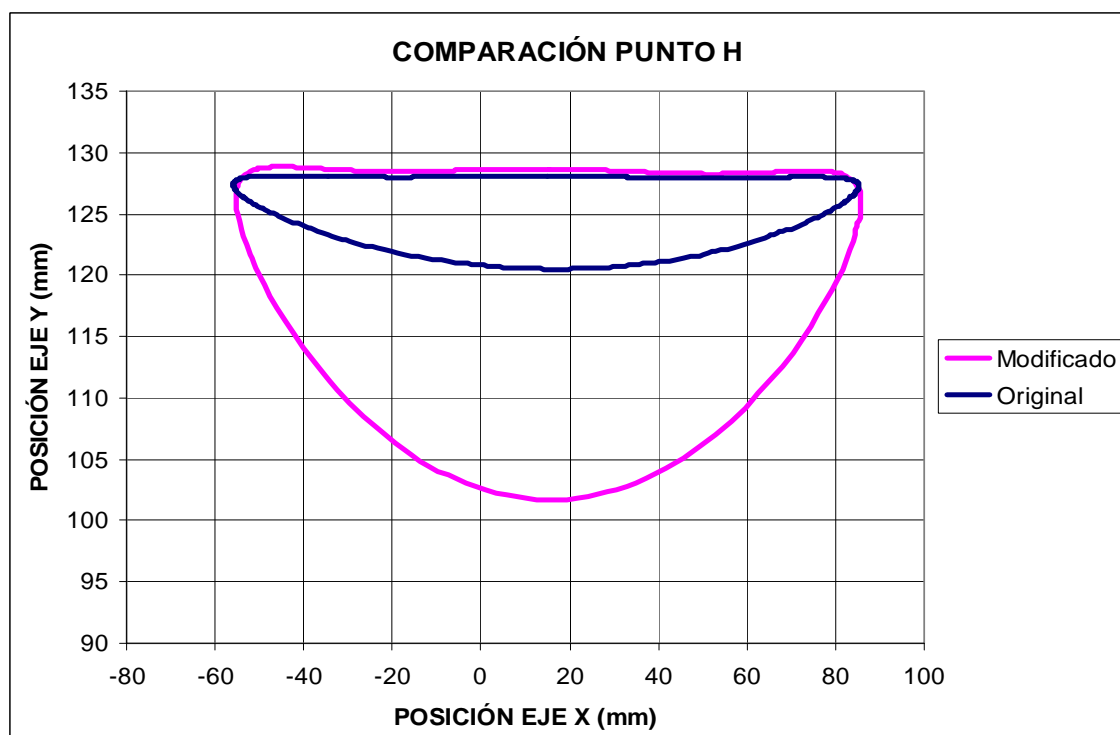
**Figura 6.59:** Comparación del punto E eje Y entre ambos modelos

### Punto F



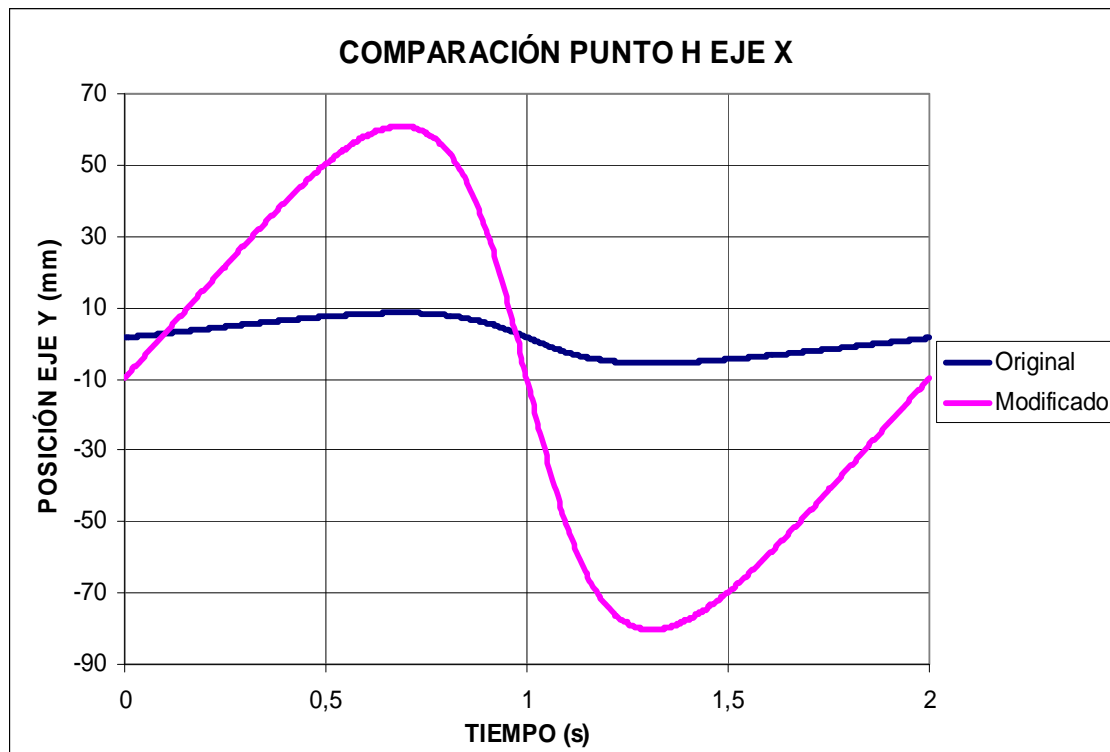
**Figura 6.60:** Comparación del punto F entre ambos modelos

### Punto H

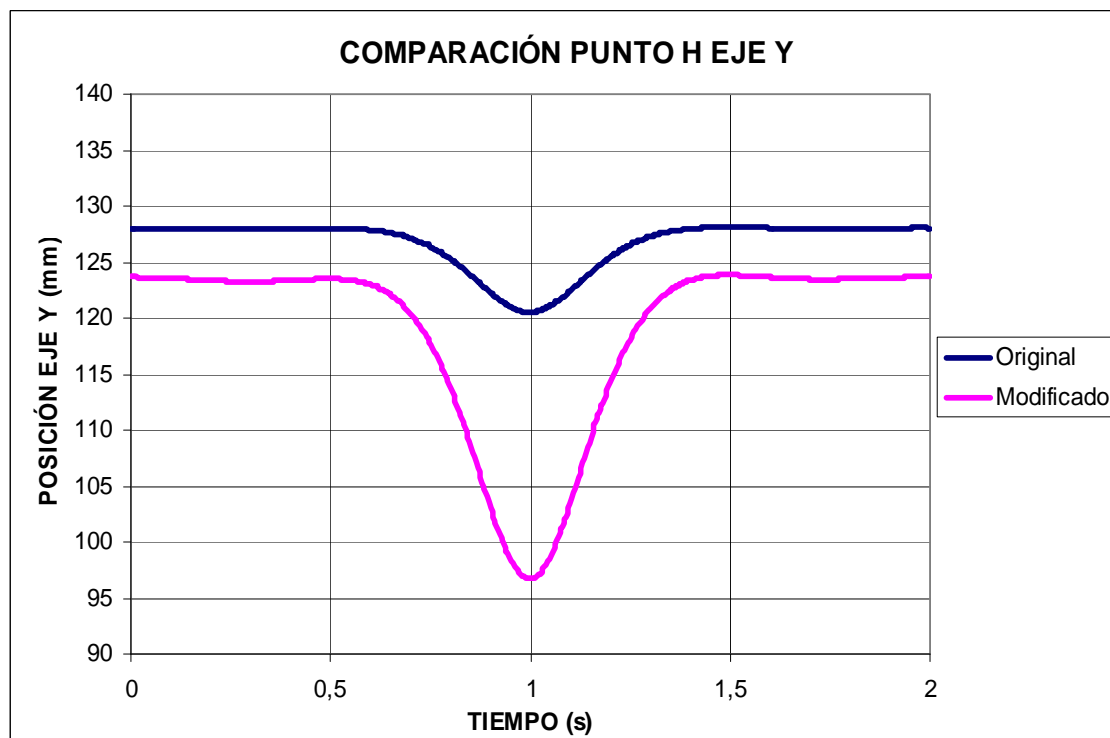




**Figura 6.61:** Comparación del punto H entre ambos modelos

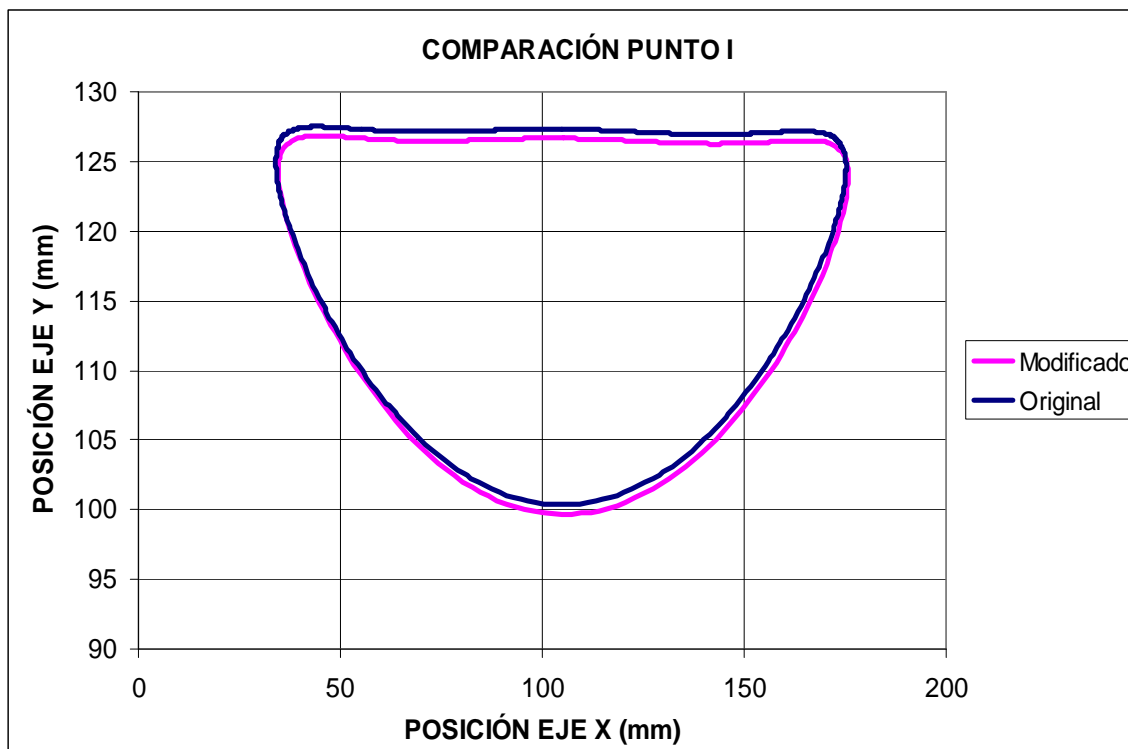


**Figura 6.62:** Comparación del punto H eje X entre ambos modelos



**Figura 6.63:** Comparación del punto H eje Y entre ambos modelos

### Punto I



**Figura 6.64:** Comparación del punto I entre ambos modelos

A través de los gráficos anteriores se puede llegar a la conclusión de que los puntos pertenecientes al mecanismo de Pantógrafo (B, F e I) en ambos modelos describen trayectorias prácticamente idénticas, por lo tanto en ese aspecto el tipo de corredera instalada no tiene ninguna influencia.

Por el contrario se aprecia de manera clara como los puntos pertenecientes al mecanismo de estabilización (A, E y H) no describen trayectorias iguales en ambos modelos. Se trata de diferencias notorias que pueden influir en el comportamiento dinámico del mecanismo. Por lo tanto es el mecanismo de estabilización el que introduce desequilibrio en el bípedo, y el que será objeto de estudio.



En el caso de la corredera modificada se observa como para los puntos A y E se obtienen valores de **desplazamientos** menores que en la corredera original, con lo cual el mecanismo funciona de manera más óptima, al realizar el mismo movimiento pero con una trayectoria menor, lo que supone un ahorro de tiempo, y por lo tanto de energía, a la hora de realizar cada ciclo. Esto es debido a que al inclinarse el estabilizador, también lo hacen los otros dos puntos de estudio el mismo ángulo, por lo tanto la trayectoria que describen llega hasta un punto superior que el punto de articulación contiguo en el caso de la corredera original.

Por el contrario para el *punto H* se obtiene el resultado inverso, ya que es el punto a partir del cual se produce este desequilibrio, y por lo tanto se recorta la trayectoria a recorrer en el modelo original.

Para el caso de las **velocidades** se observa como para el modelo modificado las velocidades que se obtienen son menores que para el caso del modelo original. Este resultado nos lleva a reforzar la teoría de que el cambio introducido en el mecanismo es positivo, ya que si se alcanzan menores velocidades de pico en las gráficas, quiere decir que está menos solicitado y que soporta menos reacciones, por lo tanto los esfuerzos en sus articulaciones también son menores.

Al tener menos velocidades necesarias en los eslabones para realizar su movimiento, la velocidad de giro del motor también se verá reducida, por lo tanto a pesar de no haber realizado un estudio dinámico a fondo del mismo, se puede concluir que se produce un ahorro de energía. Esto repercute directamente en el tiempo de duración de la batería con la que se acciona el motor, por lo tanto la autonomía del *Pasibot* se ve incrementada, suponiendo esto otra gran ventaja.

El pico de velocidad máxima lo encontramos el punto A eje X con un valor de 1.850 mm/s.



La mayor variación de velocidades entre máximos, la encontramos en también en el punto A eje X con una variación de 2.350mm/s.

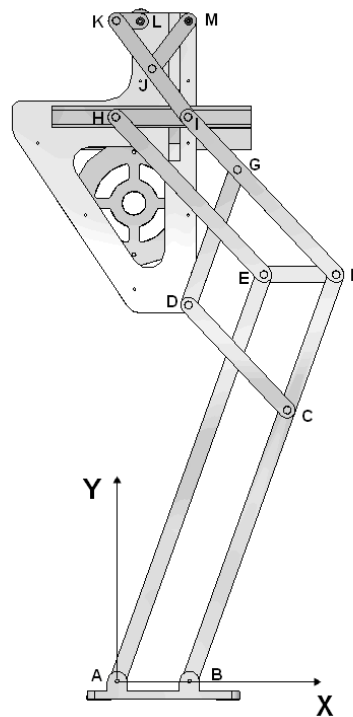
Para el caso de las **aceleraciones** se observa este mismo efecto que en el caso de las velocidades, pero en mayor medida, es decir, las diferencias entre las mismas gráficas para un modelo y otro son muy notables. Este resultado corrobora el anterior, ya que se están evitando la introducción de esfuerzos internos más elevados en el mecanismo modificado, que sí están presentes en el mecanismo original.

En el *punto H*, se observa como no se cumple lo descrito anteriormente, ya que las aceleraciones alcanzadas en el nuevo modelo son mayores que las que se encontraban en el modelo original. Este hecho es debido a que la trayectoria a recorrer en el modelo modificado es mayor, ya que cumple simetría con el punto I y realiza su misma trayectoria, por lo tanto la aceleración que necesita para recorrer esa distancia tiene que ser mayor.

El pico de aceleración máxima lo encontramos en el punto E eje Y con un valor de 26.200 mm/s<sup>2</sup> para el modelo original. Este valor se logra reducir con el nuevo modelo hasta los 22.800 mm/s<sup>2</sup>.

La mayor variación de aceleraciones entre máximos, la encontramos en también en el punto E eje Y con una variación de 11.600 mm/s<sup>2</sup>. Este intervalo se logra reducir con el nuevo modelo hasta 8.000 mm/s<sup>2</sup>.

El sistema de coordenadas utilizado es el siguiente:



**Figura 6.65:** Sistema de coordenadas



## Capítulo VII:

# *CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS*



## 7.1 CONCLUSIONES

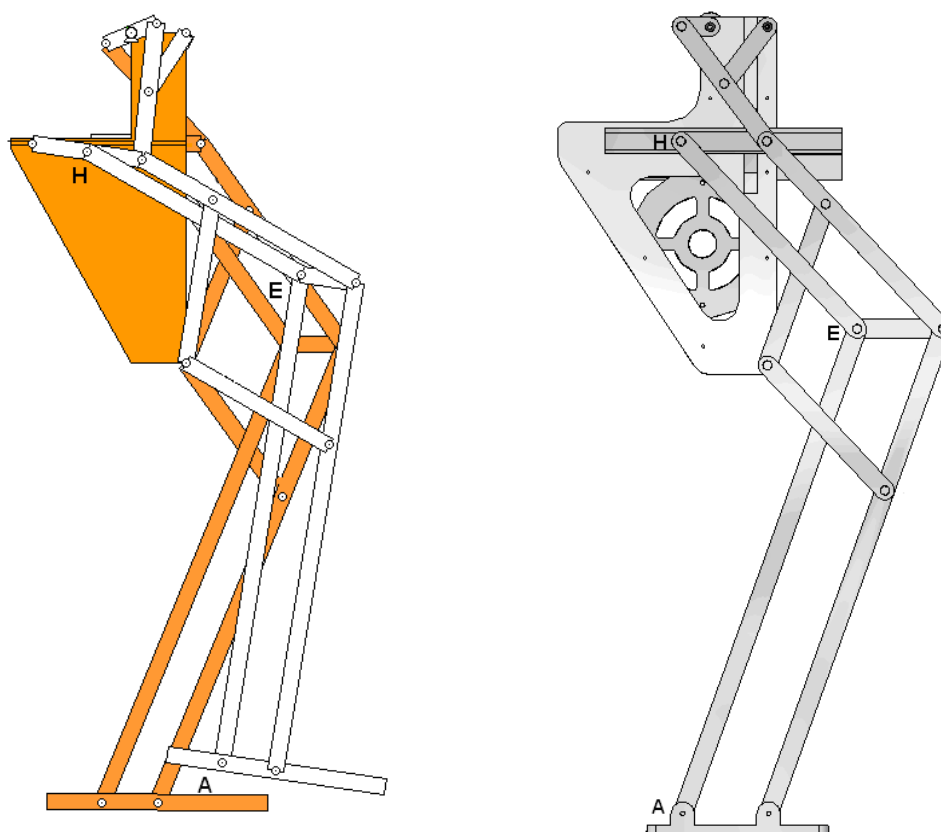
Al final del presente proyecto se puede concluir afirmando que se han alcanzado con éxito todos y cada uno de los objetivos propuestos al comienzo del mismo.

Se ha conseguido cumplir a plena satisfacción el objetivo principal, se ha realizado el diseño y análisis cinemático de un nuevo sistema de transmisión para el estabilizador que forma parte del robot bípedo PASIBOT, con el fin de evitar la inclinación del mismo en el modelo original.

- Utilizando el programa *Solid Edge ST* <sup>®</sup>, se ha diseñado un nuevo mecanismo de corredera en “T”, localizado en la cadera del robot PASIBOT y se ha verificado su funcionalidad dentro del conjunto.
- Se comprobó que no había interferencias entre las nuevas piezas instaladas y el resto del conjunto y que se movía de forma correcta.
- Posteriormente, con el programa *MSC. Adams* <sup>®</sup>, se comprobó la estabilidad del PASIBOT con el nuevo mecanismo, obteniendo resultados muy positivos: se observó que había mejorado la forma de caminar del bípedo, ya que se evitaba el balanceo hacia los lados del robot, fenómeno anteriormente inducido porque cuando los pies entraban en contacto con el suelo estaban inclinados respecto al mismo.
- “Con el nuevo sistema implementado en el robot, el pie siempre va paralelo al suelo”, mejorando su respuesta dinámica.

Estos resultados, simplemente visibles, se debían corroborar con resultados numéricos. Para ello se implementó tanto el modelo original como el nuevo modelo modificado en *Adams* y se compararon sus curvas de desplazamientos, velocidades y aceleraciones.

El análisis demostró que los únicos puntos que sufrían modificaciones en las gráficas eran los puntos A, E y H, pertenecientes al mecanismo de estabilización del Pasibot. El resto de puntos tenían un comportamiento igual en ambos modelos. Por lo tanto, el estudio se centró en la comparación de estos tres puntos.



**Figura 7.1:** Puntos de estudio A, E y H en ambos modelos

Los resultados obtenidos de las curvas de **desplazamiento** mostraron que, con el mecanismo modificado, las trayectorias que realizaban los puntos A y E eran menores que en el caso del modelo original, coincidiendo con los del punto de articulación contiguo, lo cual reduce los desequilibrios en el mecanismo al mantener la trayectoria del pie paralela al suelo en todo momento. Gracias a ello, el mecanismo funciona de manera más óptima, al realizar el mismo movimiento pero con una trayectoria menor, lo que supone un ahorro de tiempo, y por lo tanto de energía, a la hora de realizar cada ciclo.





Las curvas de **velocidades** mostraron como el mecanismo modificado generaba velocidades menores en los tres puntos de estudio. Esto se repercute beneficiosamente en robot, ya que éste se encuentra menos solicitado y soporta menos reacciones, por lo tanto los esfuerzos en sus articulaciones también son menores.

La velocidad de giro del motor también se verá reducida, por lo tanto a pesar de no haber realizado un estudio dinámico a fondo del mismo, se puede concluir que se produce un ahorro de energía.

Las curvas de **aceleraciones** mostraron que el mecanismo modificado introducía aceleraciones menores. En este caso las diferencias entre ambos modelos son más notorias, lo que indica que con el nuevo sistema se reducen los esfuerzos, mejorando la dinámica del robot.

Por lo tanto, se puede afirmar con rotundidad que el nuevo sistema de transmisión para el estabilizador del robot bípedo PASIBOT mejora las prestaciones del sistema original.



## 7.2 FUTUROS DESARROLLOS

Una vez concluido nuestro trabajo, podemos aconsejar que se sigan las siguientes vías de desarrollo para continuar con la mejora del *Pasibot*:

- **Estudio dinámico del nuevo sistema de transmisión:**

Aprovechando el modelo modificado, lo más inmediato sería realizar un análisis dinámico del robot PASIBOT, utilizando el programa *MSC. Adams*® y si los resultados benéficos se confirman, realizar la modificación correspondiente en el prototipo.

- **Ubicación adecuada del sistema de transmisión:**

Se debería estudiar más a fondo (rediseñar) la situación de todas las ruedas dentadas y ejes que forman parte del sistema de transmisión del conjunto para orientar su centro de gravedad en la posición adecuada que permita aportar mayor estabilidad al robot a la hora de caminar.

- **Empleo de diferentes materiales:**

Se debería intentar construir las piezas de otros materiales que aguanten mejor las deformaciones y sollicitaciones. Es decir, no todos los elementos están sometidos a los mismos esfuerzos, por lo tanto se podría optimizar más el diseño e incluso reducir su peso total.

- **Realización de un modelo analítico:**

Se debería realizar un modelo analítico dinámico del nuevo sistema de transmisión, integrado en el mecanismo completo del robot y compararlo con el modelo con el sistema de transmisión anterior.



## Capítulo VIII:

### *BIBLIOGRAFÍA*



## 8.1 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Documentación sobre el proyecto “PASIBOT” proporcionada por el grupo MAQLAB del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid.
  
- [2] Apuntes de la asignatura *Fundamentos de Automatización Industrial (FAI)*, de la I.T.I. Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, año 2008.
  
- [11] Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñín, Carlos Balaguer y Rafael Aracil. *Fundamentos de robótica*. 2ª Edición, McGraw-Hill, 2007. L/S 681.5.1 FUN (Biblioteca UC3M Escuela Politécnica Superior).
  
- [15] Estudio, diseño y construcción de un robot bípedo experimental. Oscar Luis Vele, Web: ([es.geocities.com/oscar\\_vele/pdfs/teoria\\_rb.pdf](http://es.geocities.com/oscar_vele/pdfs/teoria_rb.pdf))
  
- [27] Proyecto fin de carrera: “Estudio de la implantación de habilidades a un robot bípedo” desarrollado por Jorge Gallardo Mielgo. Universidad Carlos III de Madrid. Año 2008.
  
- [28] Proyecto fin de carrera: “Análisis mecánico del robot bípedo Pasibot” desarrollado por Eduardo Corral Abad. Universidad Carlos III de Madrid. Año 2008.



## 8.2 REFERENCIAS WEB

- [3] [http://es.wikipedia.org/wiki/Metr%C3%B3polis\\_\(pel%C3%ADcula\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Metr%C3%B3polis_(pel%C3%ADcula))  
(Última visita: 10/06/09)
- [4] [http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO\\_BUS=3&LEMA=robot](http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=robot)  
(Última visita: 10/06/09)
- [5] [http://es.wikipedia.org/wiki/Isaac\\_Asimov](http://es.wikipedia.org/wiki/Isaac_Asimov)  
(Última visita: 15/06/09)
- [6] <http://es.wikipedia.org/wiki/Cybertech>  
(Última visita: 15/06/09)
- [7] [http://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia\\_artificial](http://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia_artificial)  
(Última visita: 10/06/09)
- [8] [http://www.forjadores.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1967&Itemid=108](http://www.forjadores.net/index.php?option=com_content&task=view&id=1967&Itemid=108)  
(Última visita: 10/06/09)
- [9] <http://granma.co.cu/secciones/cienciaytec/cuba/cuba15.htm>  
(Última visita: 15/06/09)
- [10] <http://www.monografias.com/trabajos10/robap/robap.shtml>  
(Última visita: 15/06/09)
- [11] [http://www.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%C3%ADculo&xref=20070821klpinginf\\_96.Kes](http://www.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%C3%ADculo&xref=20070821klpinginf_96.Kes)  
(Última visita: 15/06/09)
- [13] [http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl\\_rob/robotica/historia.htm](http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl_rob/robotica/historia.htm)  
(Última visita: 15/06/09)



**[12]** [http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/asignaturas/17219/Robots\\_Servicios-Barrientos.pdf](http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/asignaturas/17219/Robots_Servicios-Barrientos.pdf) (Última visita: 16/06/09)

**[14]** [http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr\\_01/robotica/movil.htm](http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/movil.htm)  
(Última visita: 16/06/09)

**[16]** United States Patent Office 2,140,275 "Walking Toy". John E. Wilson, Watsontown, Pa. assignor of one-half to Nod F. Wagner, Watsontown, Pa. Application October 15, 1936, Serial No. 105,768.

[http://ruina.tam.cornell.edu/research/topics/locomotion\\_and\\_robotics/history.htm](http://ruina.tam.cornell.edu/research/topics/locomotion_and_robotics/history.htm)

(Última visita: 16/06/09)

**[17]** [http://elcaribecdn.com/site/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42661&catid=112:salud&Itemid=130](http://elcaribecdn.com/site/index.php?option=com_content&view=article&id=42661&catid=112:salud&Itemid=130)

(Última visita: 18/06/09)

**[18]** <http://nosequemasda.blogia.com/temas/ciencia-y-tecnologia.php>

(Última visita: 18/06/09)

**[19]** [http://www.euroresidentes.com/Blogs/avances\\_tecnologicos/2005/02/avances-en-la-robotica-robots-que.htm](http://www.euroresidentes.com/Blogs/avances_tecnologicos/2005/02/avances-en-la-robotica-robots-que.htm)

(Última visita: 18/06/09)

**[20]** <http://robotik-jjlg.blogspot.com/2009/06/robots-humanoides.html>

(Última visita: 19/06/09)

**[21]** [http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato\\_2.html](http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html)

(Última visita: 19/06/09)



**[22]** <http://www.abadiadigital.com/articulo/historia-de-los-robots-de-honda-del-proyecto-e0-a-asimo>

(Última visita: 19/06/09)

**[23]** [http://www.seguritron.com/los\\_20\\_mas.htm](http://www.seguritron.com/los_20_mas.htm)

(Última visita: 19/06/09)

**[24]** <http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/CBalaguer-CEDI2007.pdf>

(Última visita: 19/06/09)

**[25]** [http://es.wikipedia.org/wiki/Solid\\_Edge](http://es.wikipedia.org/wiki/Solid_Edge)

(Última visita: 01/08/09)

**[26]** [http://www.solidedge.es/#maxima\\_rapidez](http://www.solidedge.es/#maxima_rapidez)

(Última visita: 02/08/09)



## ANEXOS





# ANEXO A:

## *PLANOS DE CONJUNTO DEL PASIBOT*



## ANEXO B:

# *PLANO EXPLOSIONADO DEL PASIBOT*



# ANEXO C:

## *PLANOS DE LAS PIEZAS*



# ANEXO D:

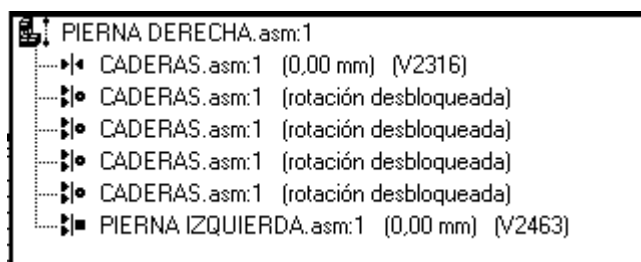
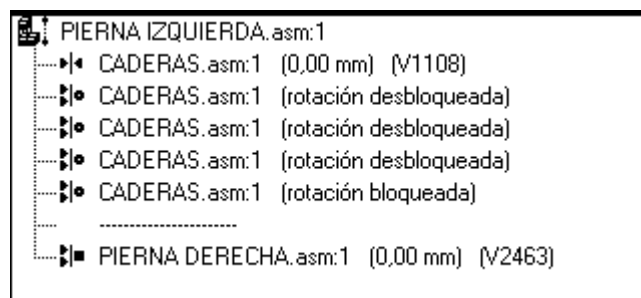
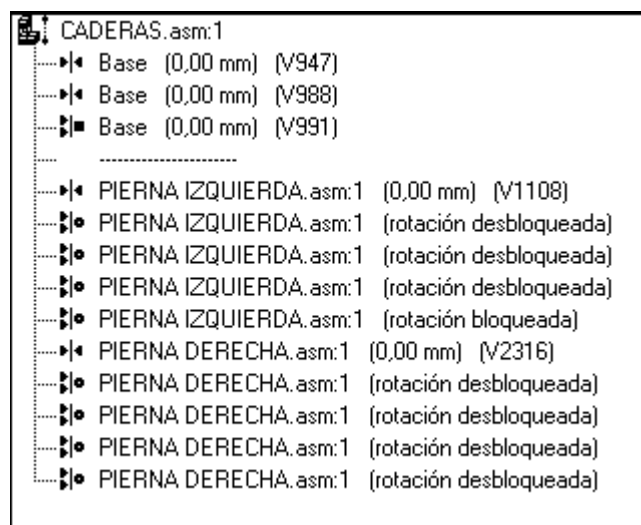
## *PLANOS DE PIEZAS MODIFICADAS*




# ANEXO E:



## *RELACIONES ASOCIATIVAS ENTRE PIEZAS*


**Relaciones de los tres subconjuntos:**







### Caderas:







 Rodamiento eje principal.par:1


- └─▶  Cadera interior derecha.par:1 (0,00 mm) (V425)
- └─▶  Cadera interior derecha.par:1 (rotación bloqueada)




 Rodamiento eje principal.par:2


- └─▶  Cadera interior izquierda.par:1 (0,00 mm) (V394)
- └─▶  Cadera interior izquierda.par:1 (rotación bloqueada)
- └─▶  Eje principal.par:1 (rotación desbloqueada)




 Eje principal.par:1


- └─▶  Manivela.par:1 (rotación bloqueada)
- └─▶  Manivela.par:1 (rotación desbloqueada)
- └─▶  Rodamiento eje principal.par:2 (rotación desbloqueada)
- └─▶  Cadera exterior izquierda 2.par:1 (0,00 mm) (V600)
- └─▶  Engranaje principal.par:1 (rotación bloqueada)
- └─▶  Correa 2.par:1 (rotación desbloqueada)




 Engranaje principal.par:1


- └─▶  Eje principal.par:1 (rotación bloqueada)
- └─▶  Cadera interior izquierda.par:1 (39,00 mm) (V751)
- └─▶  Top (xy) (0,00 mm) (V1859)




 Rosca motor.par:1


- └─▶  Pieza motor 1.par:1 (0,00 mm) (V1415)
- └─▶   Pieza motor 1.par:1 (rotación bloqueada)




 Rosca motor.par:2


- └─▶  Pieza motor 1.par:1 (0,00 mm) (V1273)
- └─▶   Pieza motor 1.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca motor.par:3


- └─▶  Pieza motor 1.par:1 (0,00 mm) (V1317)
- └─▶   Pieza motor 1.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca motor.par:4


- └─▶  Pieza motor 1.par:1 (0,00 mm) (V1378)
- └─▶   Pieza motor 1.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca con base motor.par:1


-  Pieza motor 2.par:1 (0,00 mm) (V1656)
-  Ejes roscados.par:1 (rotación desbloqueada)



 Rosca con base motor.par:2


-  Pieza motor 2.par:1 (0,00 mm) (V1504)
-  Pieza motor 2.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca con base motor.par:3


-  Pieza motor 2.par:1 (0,00 mm) (V1622)
-  Pieza motor 2.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca con base motor.par:4


-  Pieza motor 2.par:1 (0,00 mm) (V1559)
-  Pieza motor 2.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca motor.par:5


-  Cadera interior izquierda.par:1 (0,00 mm) (V1789)
-  Cadera interior izquierda.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca motor.par:6


-  Cadera interior izquierda.par:1 (0,00 mm) (V1811)
-  Cadera interior izquierda.par:1 (rotación bloqueada)



 Rosca motor.par:7

-  Cadera interior izquierda.par:1 (0,00 mm) (V1838)
-  Cadera interior izquierda.par:1 (rotación bloqueada)


 Rosca motor.par:8


-  Cadera interior izquierda.par:1 (0,00 mm) (V1763)
-  Cadera interior izquierda.par:1 (rotación bloqueada)


 Rosca con base motor.par:5


-  Cadera interior derecha.par:1 (0,00 mm) (V1894)
-  Cadera interior derecha.par:1 (rotación bloqueada)





 Rosca con base motor.par:6  
 ↳ Cadera interior derecha.par:1 (0,00 mm) (V1937)  
 ↳ Cadera interior derecha.par:1 (rotación bloqueada)


 Rosca con base motor.par:7  
 ↳ Cadera interior derecha.par:1 (0,00 mm) (V1996)  
 ↳ Cadera interior derecha.par:1 (rotación bloqueada)

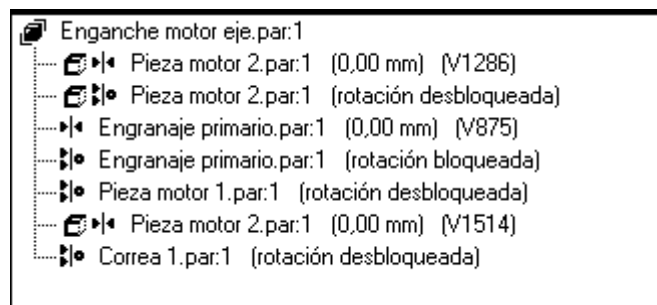
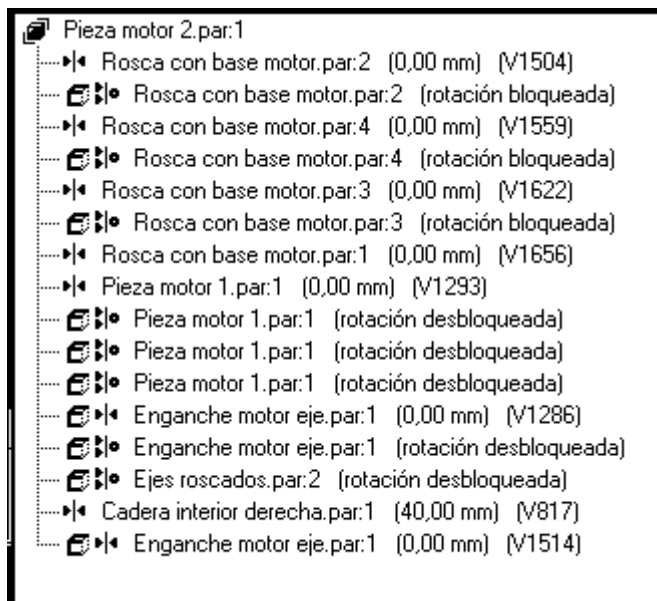
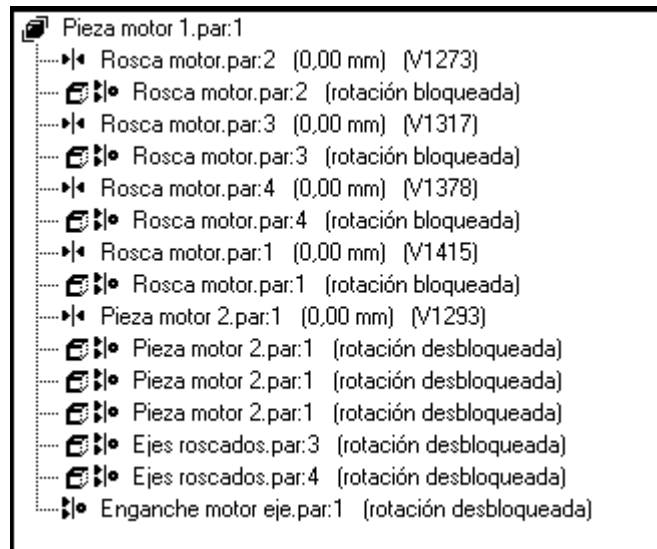
 Rosca con base motor.par:8  
 ↳ Cadera interior derecha.par:1 (0,00 mm) (V1915)  
 ↳ Cadera interior derecha.par:1 (rotación bloqueada)






 Ejes de Cadera.par:1  
 ↳ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (rotación desbloqueada)  
 ↳ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (0,00 mm) (V1424)





 Ejes de Cadera 2.par:1  
 ↳ Cadera interior izquierda.par:1 (rotación desbloqueada)  
 ↳ Cadera exterior derecha 2.par:1 (0,00 mm) (V1270)





 Deslizadera.par:1  
 ↳ Estabilizador.par:1 (rotación desbloqueada)  
 ↳ Corredera 2.par:1 (0,00 mm) (V841)  
 ↳ Corredera 2.par:1 (0,00 mm) (V895)





 Deslizadera.par:2  
 ↳ Rodamiento.par:29 (rotación desbloqueada)  
 ↳ Corredera 2.par:2 (0,00 mm) (V1365)  
 ↳ Corredera 2.par:2 (0,00 mm) (V1466)









 Ejes roscados.par:3  
 Pieza motor 1.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Cadera exterior derecha 2.par:1 (0,00 mm) (V861)  
 Cadera interior derecha.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Cadera exterior izquierda 2.par:1 (0,00 mm) (V1968)

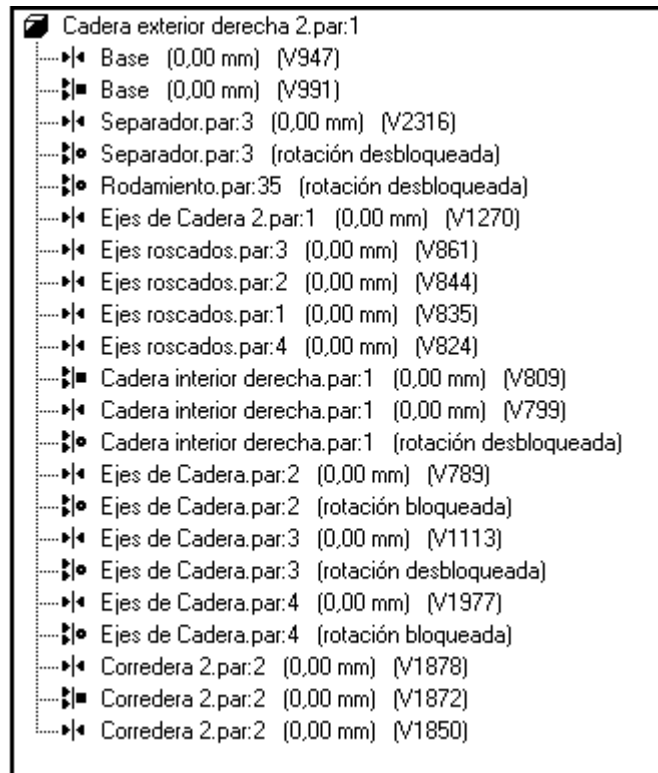
 Ejes roscados.par:2  
 Pieza motor 2.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Cadera exterior derecha 2.par:1 (0,00 mm) (V844)  
 Cadera interior derecha.par:1 (rotación desbloqueada)

 Ejes roscados.par:1  
 Rosca con base motor.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Cadera exterior derecha 2.par:1 (0,00 mm) (V835)  
 Cadera interior derecha.par:1 (rotación desbloqueada)

 Ejes roscados.par:4  
 Pieza motor 1.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Cadera exterior derecha 2.par:1 (0,00 mm) (V824)  
 Cadera interior derecha.par:1 (rotación desbloqueada)

 Engranaje primario.par:1  
 Enganche motor eje.par:1 (0,00 mm) (V875)  
 Enganche motor eje.par:1 (rotación bloqueada)

 Engranaje secundario.par:1  
 Ejes de Cadera.par:4 (rotación desbloqueada)  
 Cadera exterior izquierda 2.par:1 (23,00 mm) (V1962)

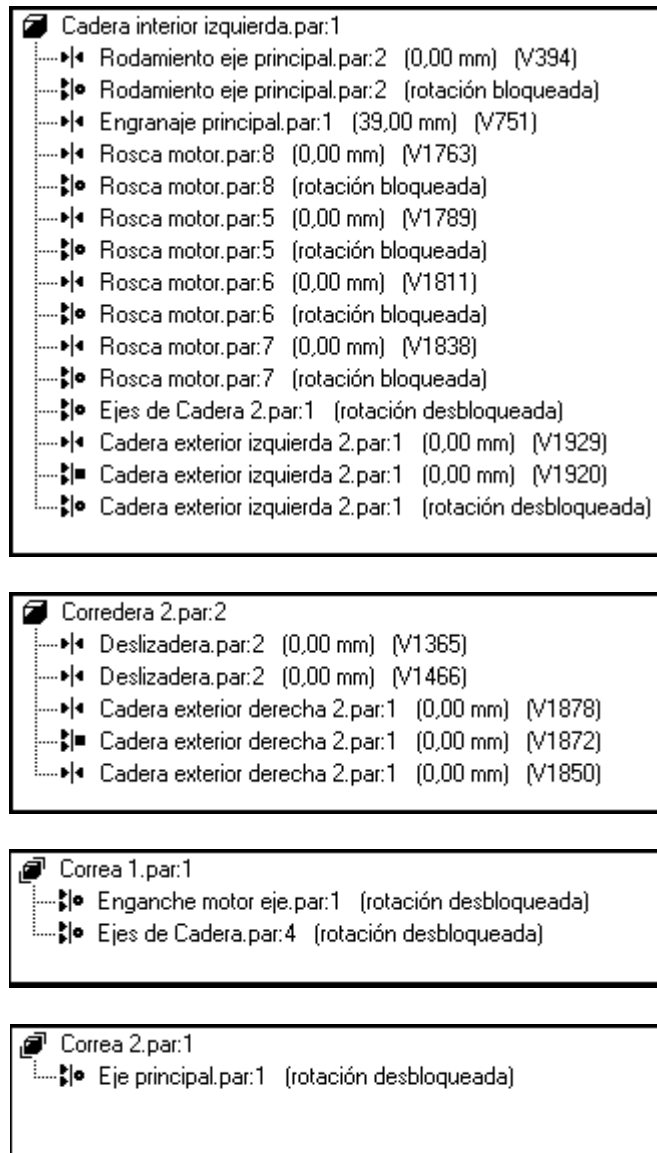


- Ejes de Cadera.par:3
  - ▶ Cadera exterior derecha 2.par:1 (0,00 mm) (V1113)
  - ▶ Cadera exterior derecha 2.par:1 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (rotación desbloqueada)

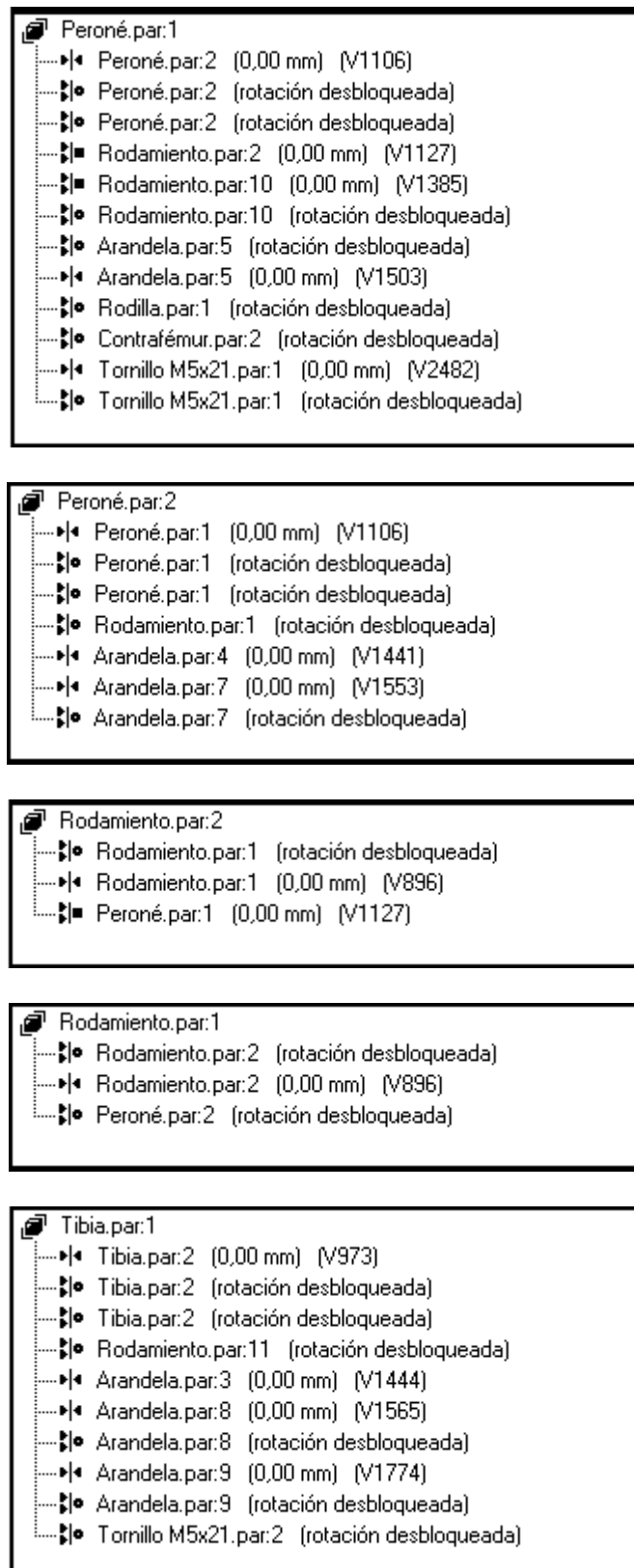
- Ejes de Cadera.par:4
  - ▶ Engranaje secundario.par:1 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Cadera exterior derecha 2.par:1 (0,00 mm) (V1977)
  - ▶ Cadera exterior derecha 2.par:1 (rotación bloqueada)
  - ▶ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Correa 1.par:1 (rotación desbloqueada)

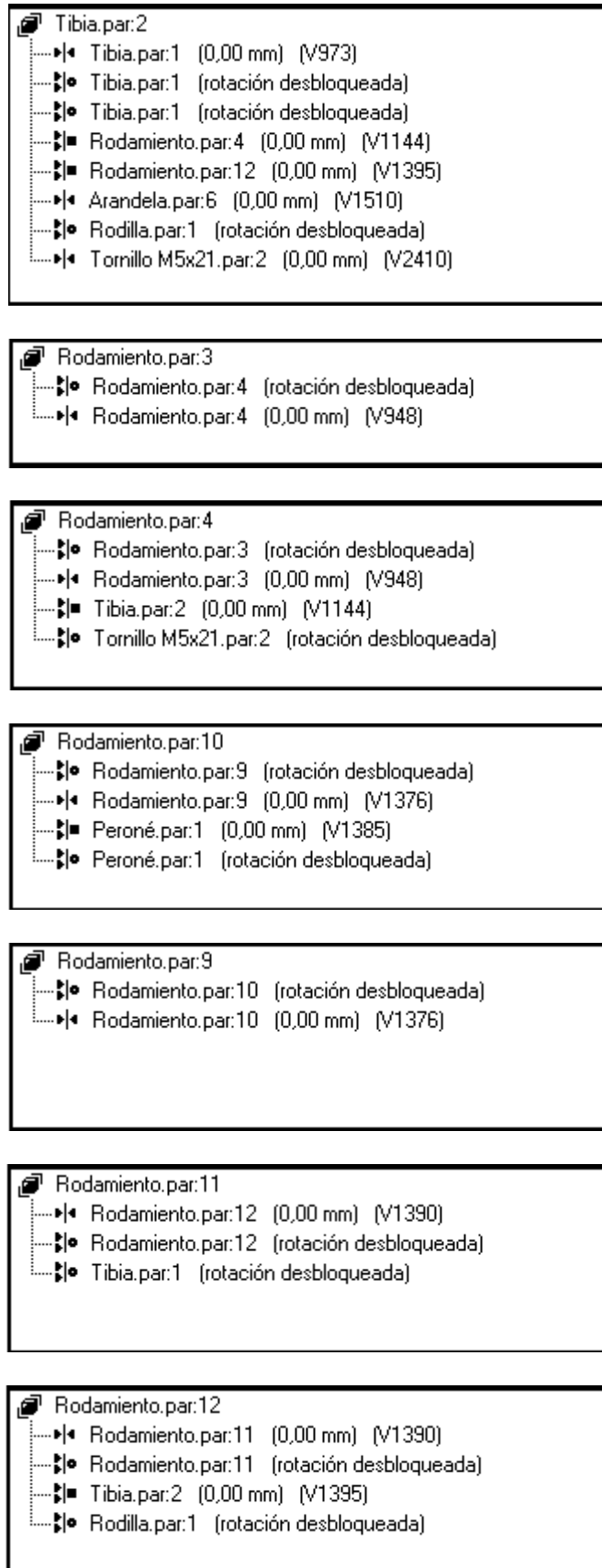
- Cadera exterior izquierda 2.par:1
  - ▶ Base (0,00 mm) (V988)
  - ▶ Separador.par:5 (0,00 mm) (V1108)
  - ▶ Rodamiento.par:16 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Arandela.par:18 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Eje principal.par:1 (0,00 mm) (V600)
  - ▶ Ejes de Cadera.par:1 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Ejes de Cadera.par:1 (0,00 mm) (V1424)
  - ▶ Ejes roscados.par:3 (0,00 mm) (V1968)
  - ▶ Engranaje secundario.par:1 (23,00 mm) (V1962)
  - ▶ Ejes de Cadera.par:2 (0,00 mm) (V1957)
  - ▶ Ejes de Cadera.par:2 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Ejes de Cadera.par:4 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Ejes de Cadera.par:3 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Cadera interior izquierda.par:1 (0,00 mm) (V1929)
  - ▶ Cadera interior izquierda.par:1 (0,00 mm) (V1920)
  - ▶ Cadera interior izquierda.par:1 (rotación desbloqueada)
  - ▶ Corredera 2.par:1 (0,00 mm) (V1903)
  - ▶ Corredera 2.par:1 (0,00 mm) (V1896)
  - ▶ Corredera 2.par:1 (0,00 mm) (V1884)

- Corredera 2.par:1
  - ▶ Deslizadera.par:1 (0,00 mm) (V841)
  - ▶ Deslizadera.par:1 (0,00 mm) (V895)
  - ▶ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (0,00 mm) (V1903)
  - ▶ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (0,00 mm) (V1896)
  - ▶ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (0,00 mm) (V1884)



**Pierna izquierda:**







Rodilla.par:1

- └─▶ Arandela.par:6 (0,00 mm) (V1521)
- └─▶ Arandela.par:5 (0,00 mm) (V1526)
- └─▶ Tibia.par:2 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Peroné.par:1 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Fémur.par:1 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Arandela.par:6 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Rodamiento.par:12 (rotación desbloqueada)

Arandela.par:4

- └─▶ Peroné.par:2 (0,00 mm) (V1441)

Arandela.par:3

- └─▶ Tibia.par:1 (0,00 mm) (V1444)
- └─▶ Tornillo M5x21.par:2 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Pie izquierdo.par:1 (0,00 mm) (V2388)

Arandela.par:5

- └─▶ Peroné.par:1 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Peroné.par:1 (0,00 mm) (V1503)
- └─▶ Rodilla.par:1 (0,00 mm) (V1526)

Arandela.par:6

- └─▶ Tibia.par:2 (0,00 mm) (V1510)
- └─▶ Rodilla.par:1 (0,00 mm) (V1521)
- └─▶ Rodilla.par:1 (rotación desbloqueada)

Arandela.par:8

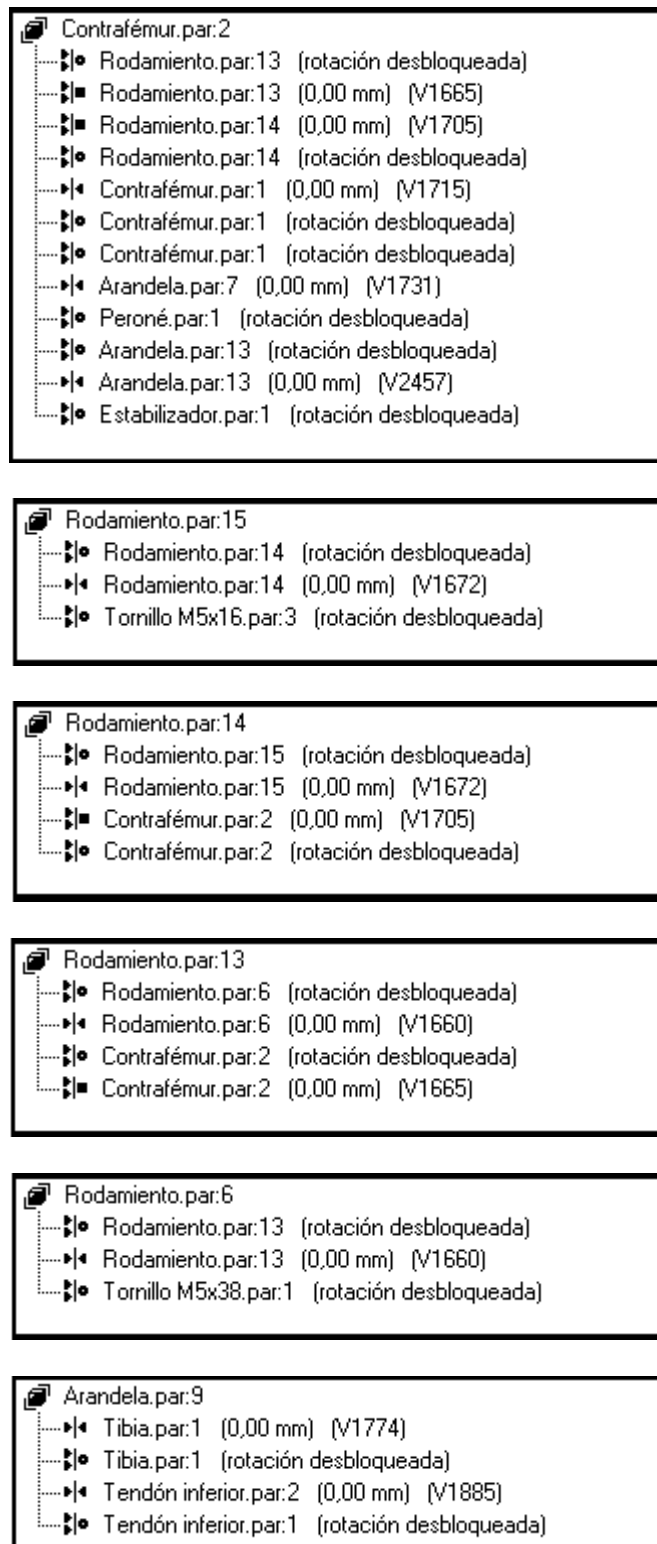
- └─▶ Tibia.par:1 (0,00 mm) (V1565)
- └─▶ Tibia.par:1 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Separador.par:2 (0,00 mm) (V1931)

Arandela.par:7

- └─▶ Peroné.par:2 (0,00 mm) (V1553)
- └─▶ Peroné.par:2 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Contrafémur.par:2 (0,00 mm) (V1731)

Contrafémur.par:1

- └─▶ Contrafémur.par:2 (0,00 mm) (V1715)
- └─▶ Contrafémur.par:2 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Contrafémur.par:2 (rotación desbloqueada)
- └─▶ Tornillo M5x38.par:1 (0,00 mm) (V1130)
- └─▶ Tornillo M5x16.par:3 (0,00 mm) (V942)



Rodamiento.par:19

- ▶ Rodamiento.par:20 (0,00 mm) (V1878)
- ▶ Tendón inferior.par:2 (0,00 mm) (V1882)
- ▶ Rodamiento.par:20 (rotación desbloqueada)

Tendón inferior.par:1

- ▶ Tendón inferior.par:2 (0,00 mm) (V1792)
- ▶ Tendón inferior.par:2 (rotación desbloqueada)
- ▶ Tendón inferior.par:2 (rotación desbloqueada)
- ▶ Rodamiento.par:18 (rotación desbloqueada)
- ▶ Arandela.par:9 (rotación desbloqueada)
- ▶ Tornillo M5x21.par:4 (0,00 mm) (V2450)
- ▶ Tornillo M5x16.par:2 (0,00 mm) (V1888)

Tendón inferior.par:2

- ▶ Tendón inferior.par:1 (0,00 mm) (V1792)
- ▶ Tendón inferior.par:1 (rotación desbloqueada)
- ▶ Tendón inferior.par:1 (rotación desbloqueada)
- ▶ Rodamiento.par:18 (0,00 mm) (V1853)
- ▶ Rodamiento.par:20 (rotación desbloqueada)
- ▶ Rodamiento.par:19 (0,00 mm) (V1882)
- ▶ Arandela.par:9 (0,00 mm) (V1885)
- ▶ Arandela.par:11 (0,00 mm) (V2242)
- ▶ Rodamiento.par:20 (rotación desbloqueada)

Rodamiento.par:20

- ▶ Rodamiento.par:19 (0,00 mm) (V1878)
- ▶ Tendón inferior.par:2 (rotación desbloqueada)
- ▶ Tendón inferior.par:2 (rotación desbloqueada)
- ▶ Rodamiento.par:19 (rotación desbloqueada)
- ▶ Tornillo M5x21.par:4 (rotación desbloqueada)

Rodamiento.par:18

- ▶ Rodamiento.par:16 (rotación desbloqueada)
- ▶ Rodamiento.par:16 (0,00 mm) (V1850)
- ▶ Tendón inferior.par:2 (0,00 mm) (V1853)
- ▶ Tendón inferior.par:1 (rotación desbloqueada)
- ▶ Tendón superior.par:1 (rotación desbloqueada)

Rodamiento.par:16

- ▶ Cadera exterior izquierda 2.par:1 (rotación desbloqueada)
- ▶ Rodamiento.par:18 (rotación desbloqueada)
- ▶ Rodamiento.par:18 (0,00 mm) (V1850)
- ▶ Tornillo M5x16.par:2 (rotación desbloqueada)

Separador.par:2

- Separador.par:1 (rotación desbloqueada)
- Separador.par:1 (0,00 mm) (V1925)
- Arandela.par:8 (0,00 mm) (V1931)

Separador.par:1

- Separador.par:2 (rotación desbloqueada)
- Separador.par:2 (0,00 mm) (V1925)
- Rodamiento.par:22 (rotación desbloqueada)
- Rodamiento.par:21 (0,00 mm) (V1982)
- Arandela.par:1 (0,00 mm) (V1993)
- Fémur.par:2 (rotación desbloqueada)
- Arandela.par:1 (rotación desbloqueada)

Rodamiento.par:22

- Rodamiento.par:21 (rotación desbloqueada)
- Rodamiento.par:21 (0,00 mm) (V1977)
- Separador.par:1 (rotación desbloqueada)

Rodamiento.par:21

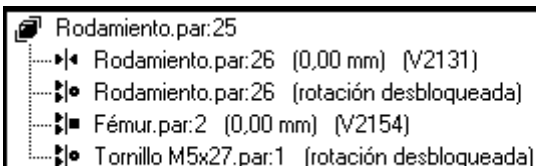
- Rodamiento.par:22 (rotación desbloqueada)
- Rodamiento.par:22 (0,00 mm) (V1977)
- Separador.par:1 (0,00 mm) (V1982)

Arandela.par:1

- Separador.par:1 (0,00 mm) (V1993)
- Fémur.par:1 (0,00 mm) (V2212)
- Fémur.par:1 (0,00 mm) (V954)
- Separador.par:1 (rotación desbloqueada)

Fémur.par:1

- Fémur.par:2 (0,00 mm) (V2015)
- Fémur.par:2 (rotación desbloqueada)
- Fémur.par:2 (rotación desbloqueada)
- Arandela.par:1 (0,00 mm) (V2212)
- Arandela.par:10 (0,00 mm) (V2235)
- Arandela.par:14 (0,00 mm) (V2467)
- Biela.par:1 (rotación desbloqueada)
- Tendón superior.par:1 (rotación desbloqueada)
- Rodilla.par:1 (rotación desbloqueada)
- Arandela.par:1 (0,00 mm) (V954)



Rodamiento.par:26  
 └─▶ Rodamiento.par:25 (0,00 mm) (V2131)  
 └─▶ Rodamiento.par:25 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Fémur.par:2 (rotación desbloqueada)

Arandela.par:10  
 └─▶ Fémur.par:1 (0,00 mm) (V2235)  
 └─▶ Tendón superior.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Separador.par:3 (0,00 mm) (V2423)


Arandela.par:11  
 └─▶ Tendón inferior.par:2 (0,00 mm) (V2242)  
 └─▶ Tendón superior.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Tendón superior.par:1 (0,00 mm) (V2330)


Tendón superior.par:1  
 └─▶ Arandela.par:10 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Arandela.par:11 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Arandela.par:11 (0,00 mm) (V2330)  
 └─▶ Arandela.par:12 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Arandela.par:12 (0,00 mm) (V2350)  
 └─▶ Separador.par:3 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Fémur.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Rodamiento.par:18 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Arandela.par:15 (0,00 mm) (V2576)  
 └─▶ Arandela.par:15 (rotación desbloqueada)


Arandela.par:12  
 └─▶ Tendón superior.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Tendón superior.par:1 (0,00 mm) (V2350)


Separador.par:3  
 └─▶ Rodamiento.par:28 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Rodamiento.par:28 (0,00 mm) (V2408)  
 └─▶ Separador.par:4 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Separador.par:4 (0,00 mm) (V2413)  
 └─▶ Tendón superior.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Arandela.par:10 (0,00 mm) (V2423)


Separador.par:4  
 └─▶ Separador.par:3 (rotación desbloqueada)  
 └─▶ Separador.par:3 (0,00 mm) (V2413)


 Rodamiento.par:29  
 └─┐• Rodamiento.par:28 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Rodamiento.par:28 (0,00 mm) (V2387)

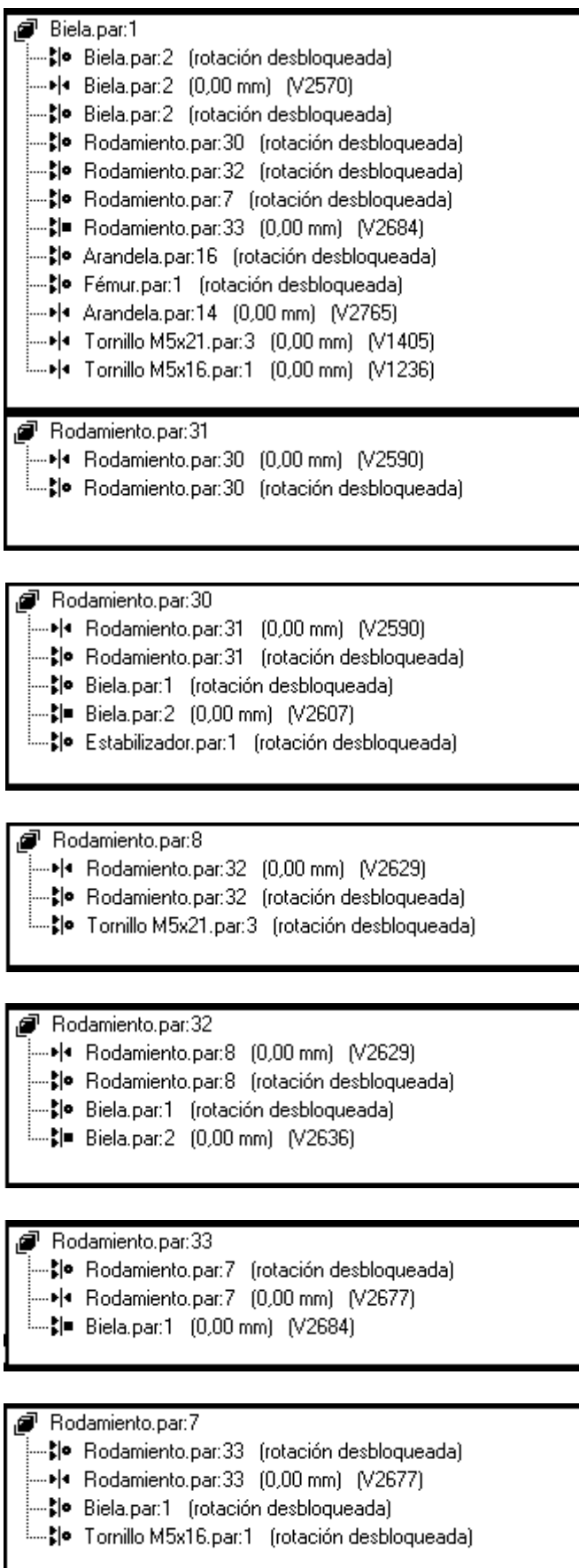
 Rodamiento.par:28  
 └─┐• Rodamiento.par:29 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Rodamiento.par:29 (0,00 mm) (V2387)  
 └─┐• Separador.par:3 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Separador.par:3 (0,00 mm) (V2408)

 Arandela.par:14  
 └─┐• Fémur.par:1 (0,00 mm) (V2467)  
 └─┐• Estabilizador.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Biela.par:1 (0,00 mm) (V2765)

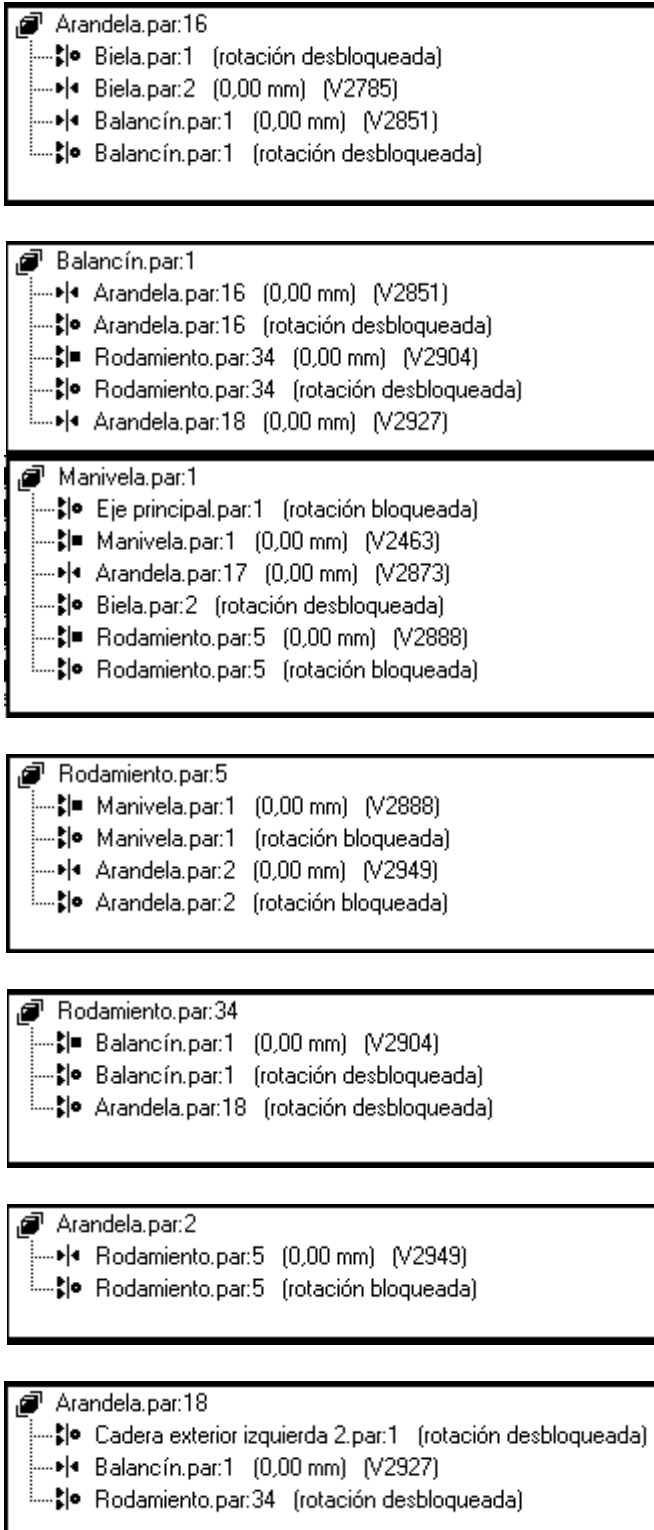
 Arandela.par:13  
 └─┐• Contrafémur.par:2 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Contrafémur.par:2 (0,00 mm) (V2457)  
 └─┐• Estabilizador.par:1 (0,00 mm) (V2521)

 Estabilizador.par:1  
 └─┐• Deslizadera.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Arandela.par:14 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Contrafémur.par:2 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Arandela.par:13 (0,00 mm) (V2521)  
 └─┐• Rodamiento.par:30 (rotación desbloqueada)

 Biela.par:2  
 └─┐• Biela.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Biela.par:1 (0,00 mm) (V2570)  
 └─┐• Biela.par:1 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Rodamiento.par:30 (0,00 mm) (V2607)  
 └─┐• Rodamiento.par:32 (0,00 mm) (V2636)  
 └─┐• Arandela.par:16 (0,00 mm) (V2785)  
 └─┐• Arandela.par:17 (0,00 mm) (V2822)  
 └─┐• Arandela.par:17 (rotación desbloqueada)  
 └─┐• Manivela.par:1 (rotación desbloqueada)







Arandela.par:15  
 Tendón superior.par:1 (0,00 mm) (V2576)  
 Tendón superior.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Separador.par:5 (rotación desbloqueada)  
 Separador.par:5 (0,00 mm) (V2639)

Separador.par:5  
 Cadera exterior izquierda 2.par:1 (0,00 mm) (V1108)  
 Arandela.par:15 (rotación desbloqueada)  
 Arandela.par:15 (0,00 mm) (V2639)

Tornillo M5x21.par:1  
 Peroné.par:1 (0,00 mm) (V2482)  
 Peroné.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Pie izquierdo.par:1 (rotación desbloqueada)

Tornillo M5x21.par:2  
 Tibia.par:2 (0,00 mm) (V2410)  
 Rodamiento.par:4 (rotación desbloqueada)  
 Tibia.par:1 (rotación desbloqueada)  
 Arandela.par:3 (rotación desbloqueada)  
 Pie izquierdo.par:1 (rotación desbloqueada)

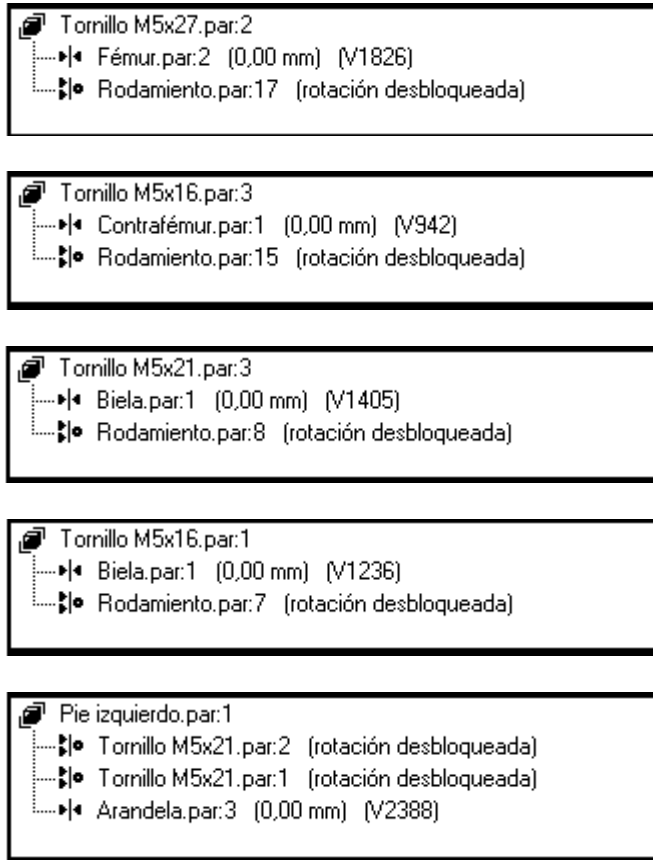
Tornillo M5x21.par:4  
 Tendón inferior.par:1 (0,00 mm) (V2450)  
 Rodamiento.par:20 (rotación desbloqueada)

Tornillo M5x16.par:2  
 Tendón inferior.par:1 (0,00 mm) (V1888)  
 Rodamiento.par:16 (rotación desbloqueada)

Tornillo M5x38.par:2  
 Fémur.par:2 (0,00 mm) (V1695)  
 Rodamiento.par:23 (rotación desbloqueada)

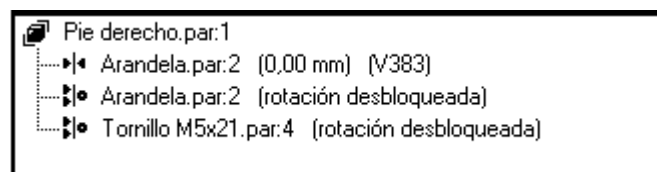
Tornillo M5x38.par:1  
 Contrafémur.par:1 (0,00 mm) (V1130)  
 Rodamiento.par:6 (rotación desbloqueada)

Tornillo M5x27.par:1  
 Fémur.par:2 (0,00 mm) (V1889)  
 Rodamiento.par:25 (rotación desbloqueada)



### **Pierna derecha:**

Todas las relaciones son iguales excepto la del pie derecho.



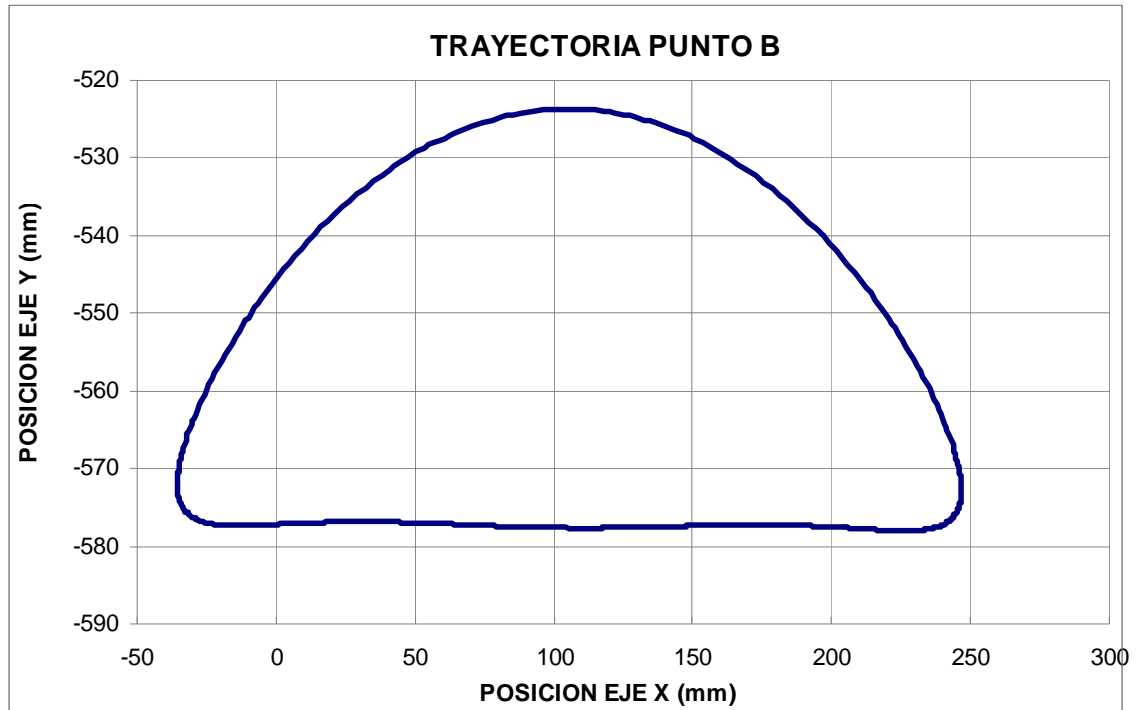


# ANEXO F:

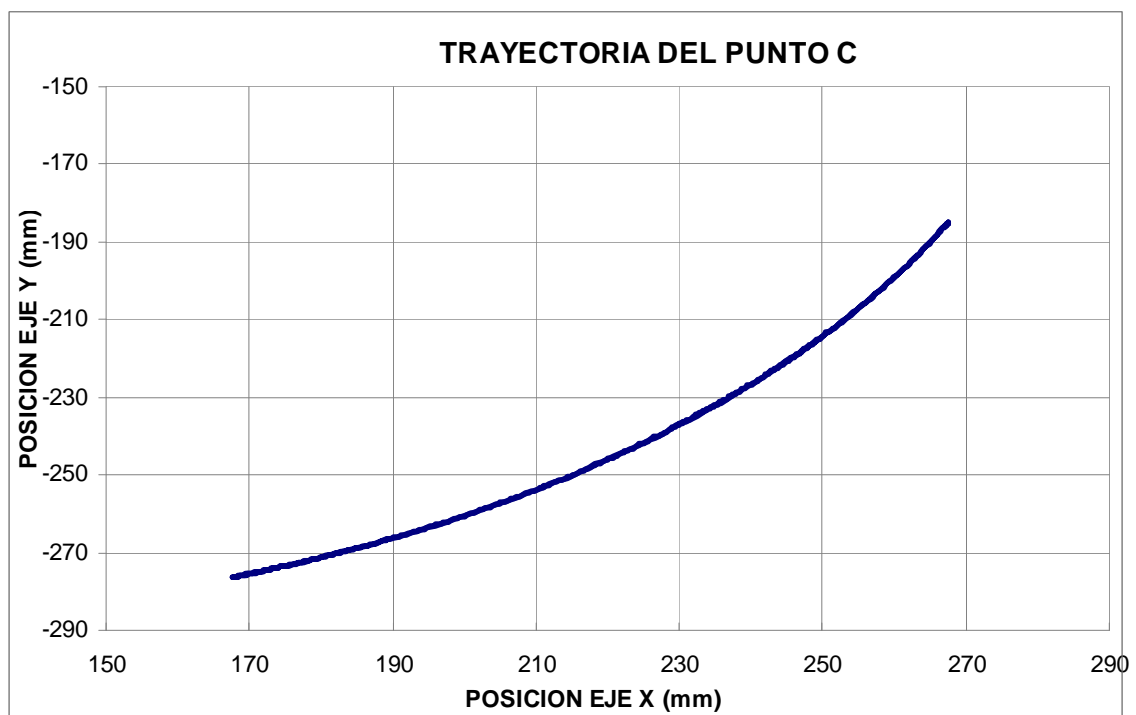
## *GRÁFICAS DEL PASIBOT EN ADAMS*

## Trayectorias Pasibot original

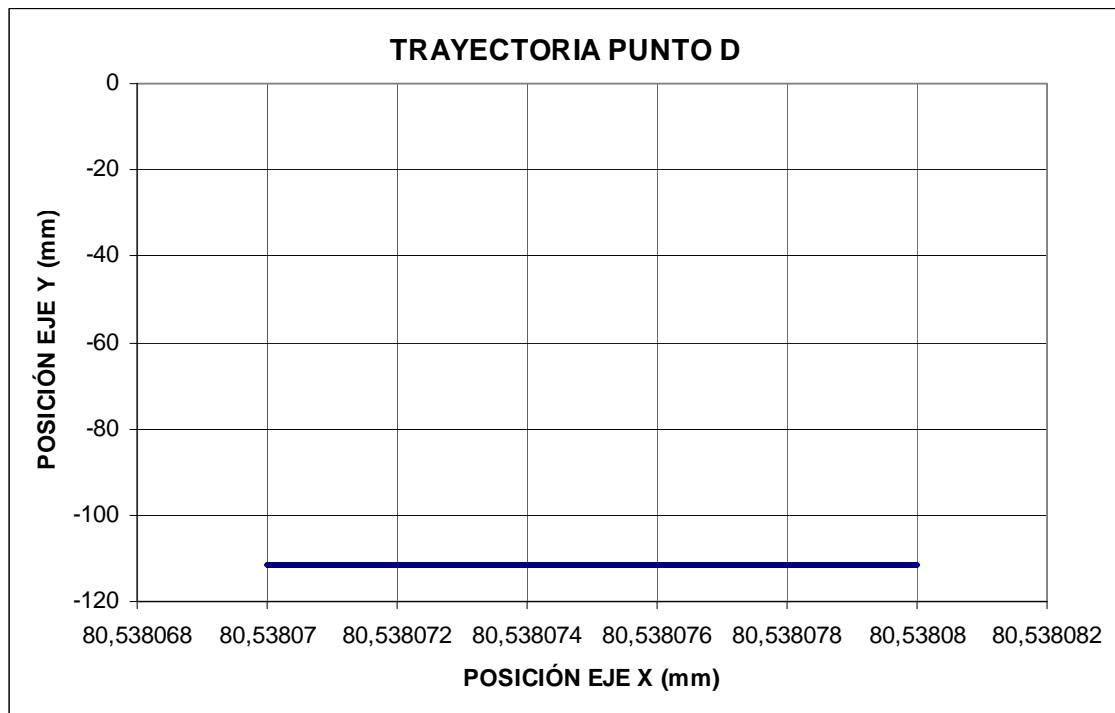
### Punto B



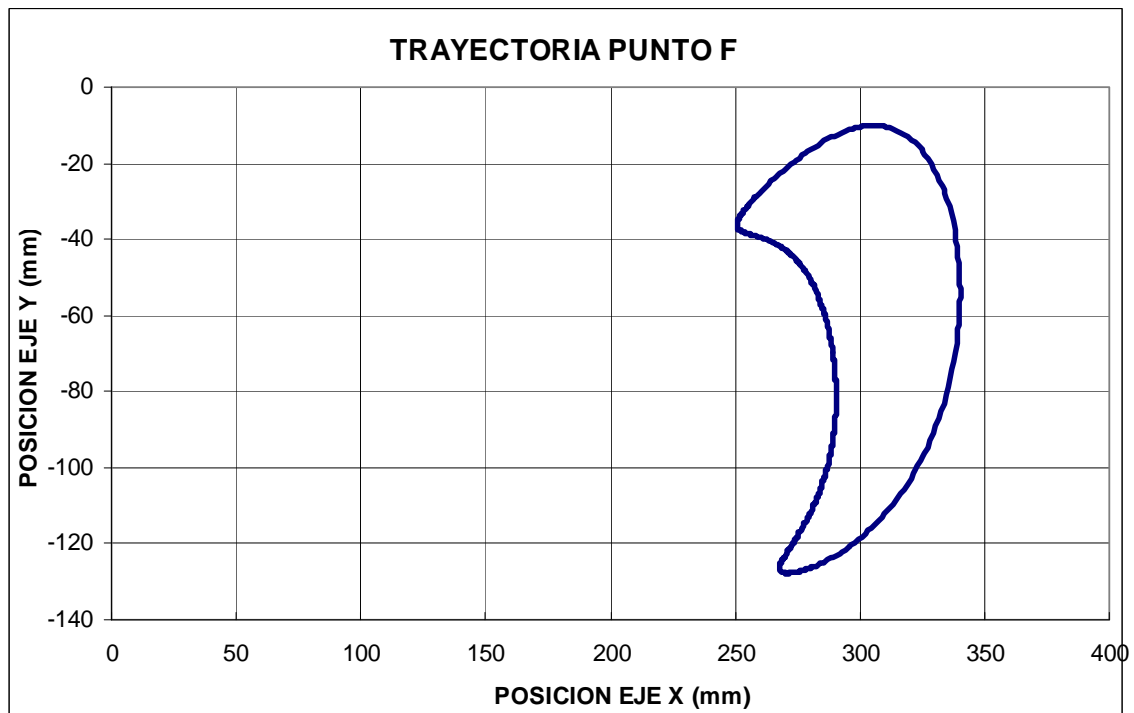
### Punto C



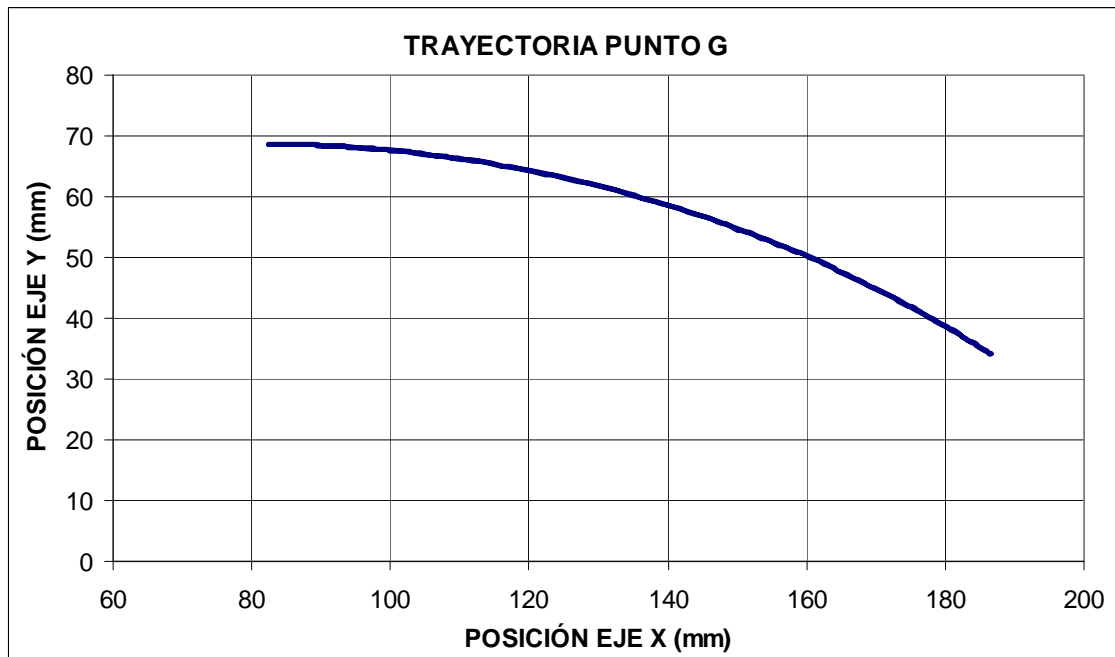
### Punto D



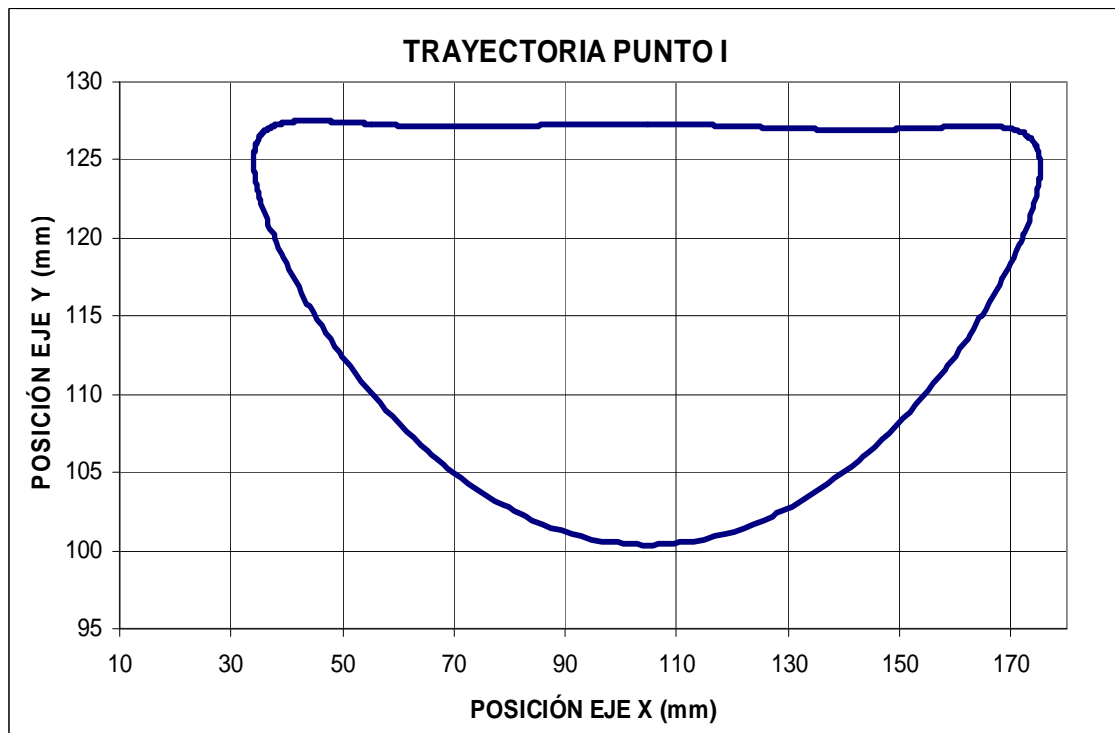
### Punto F



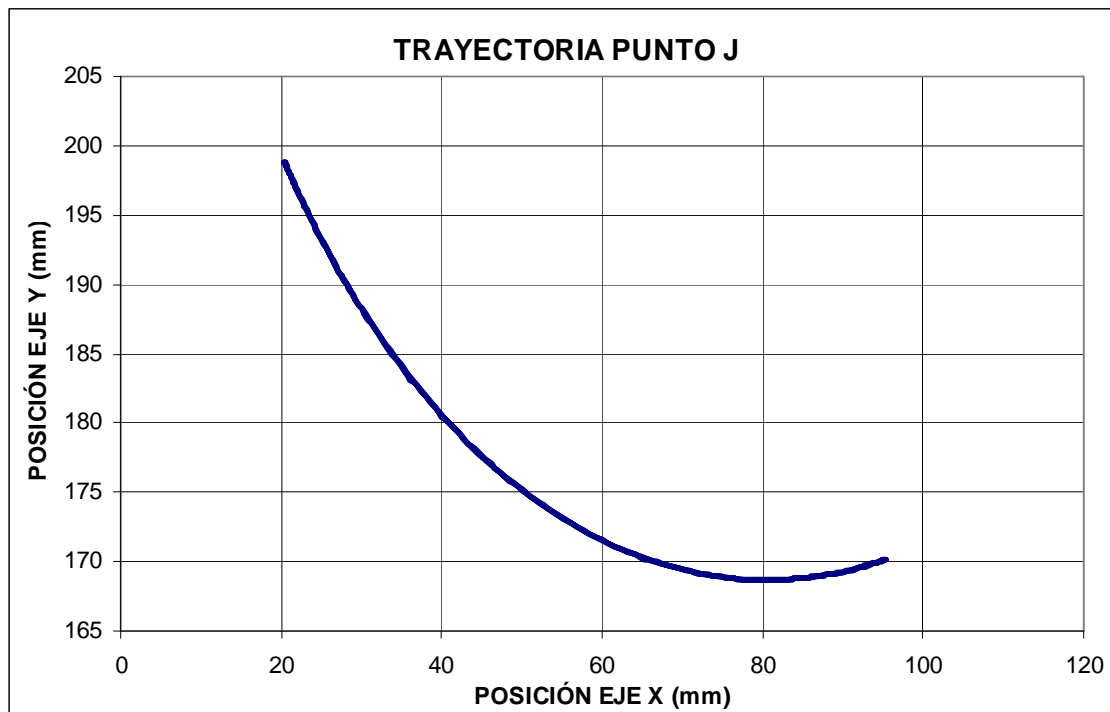
### Punto G



### Punto I

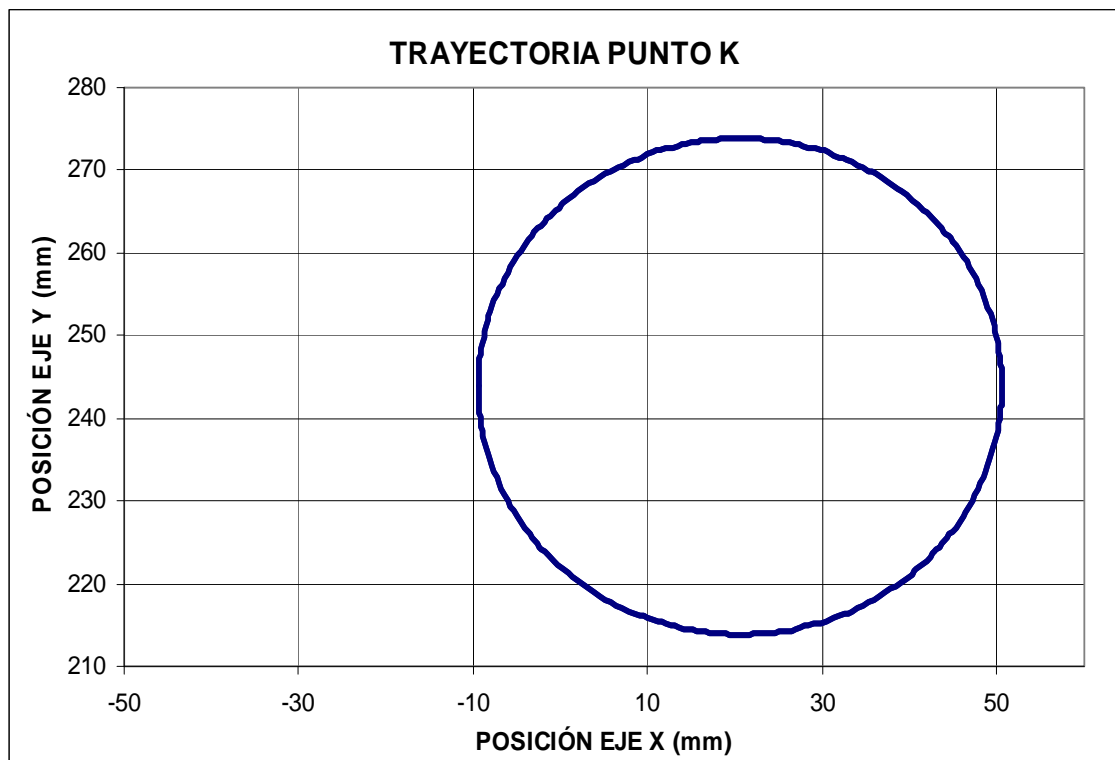


### Punto J

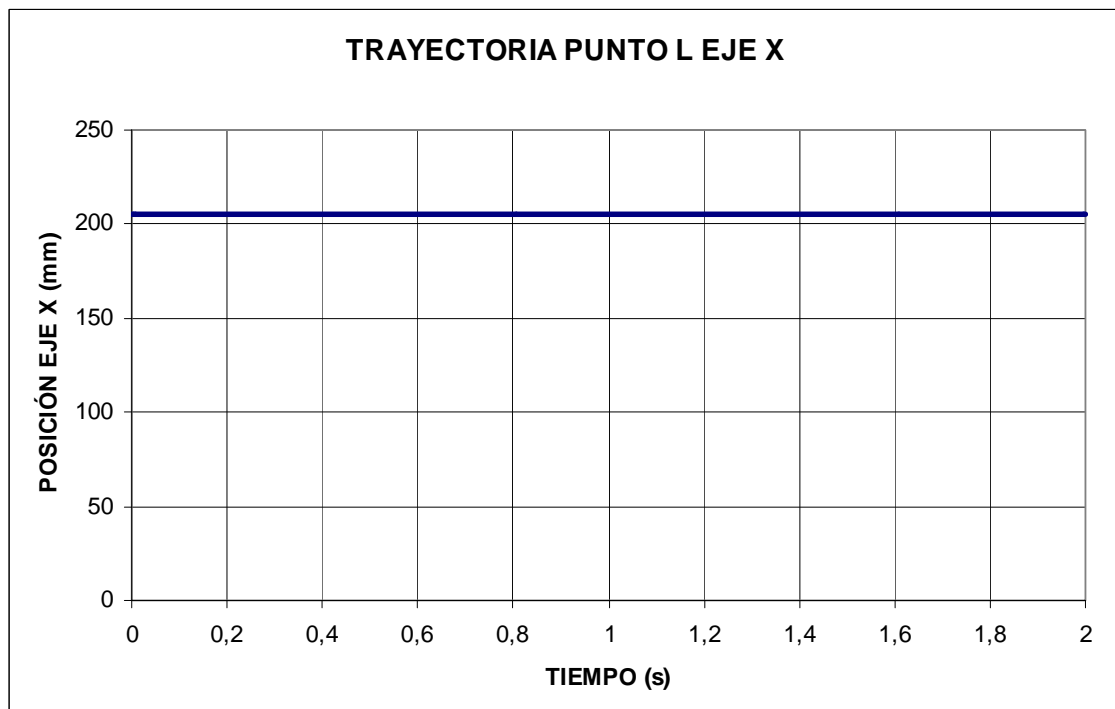


### Punto K

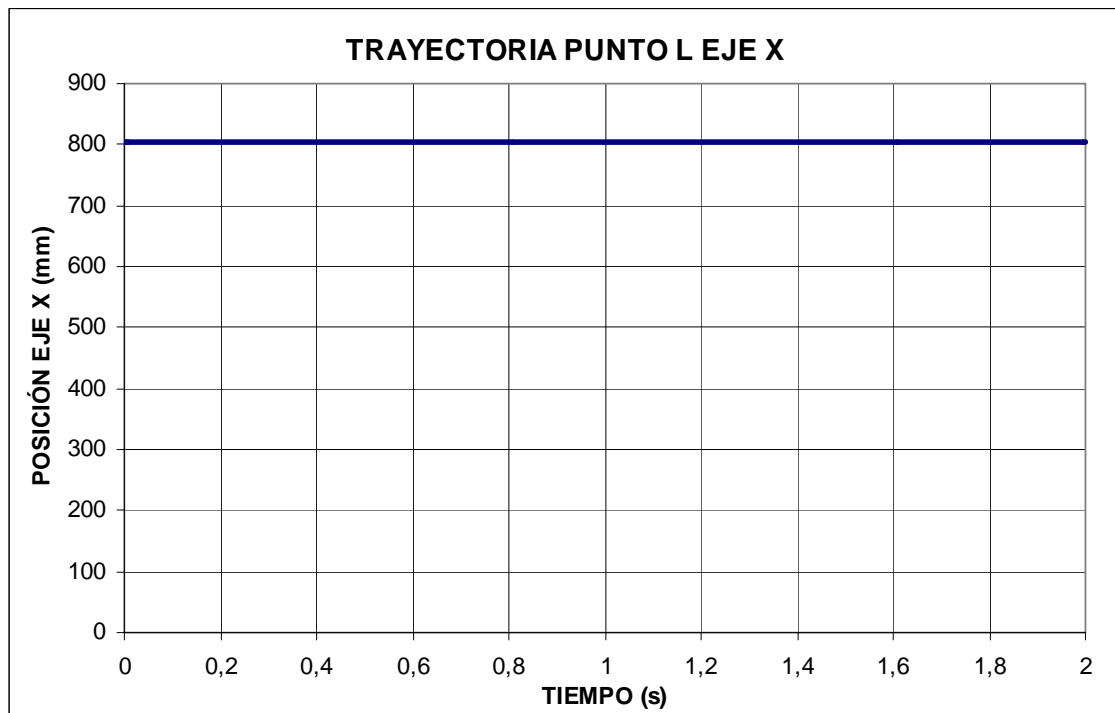




### Punto L

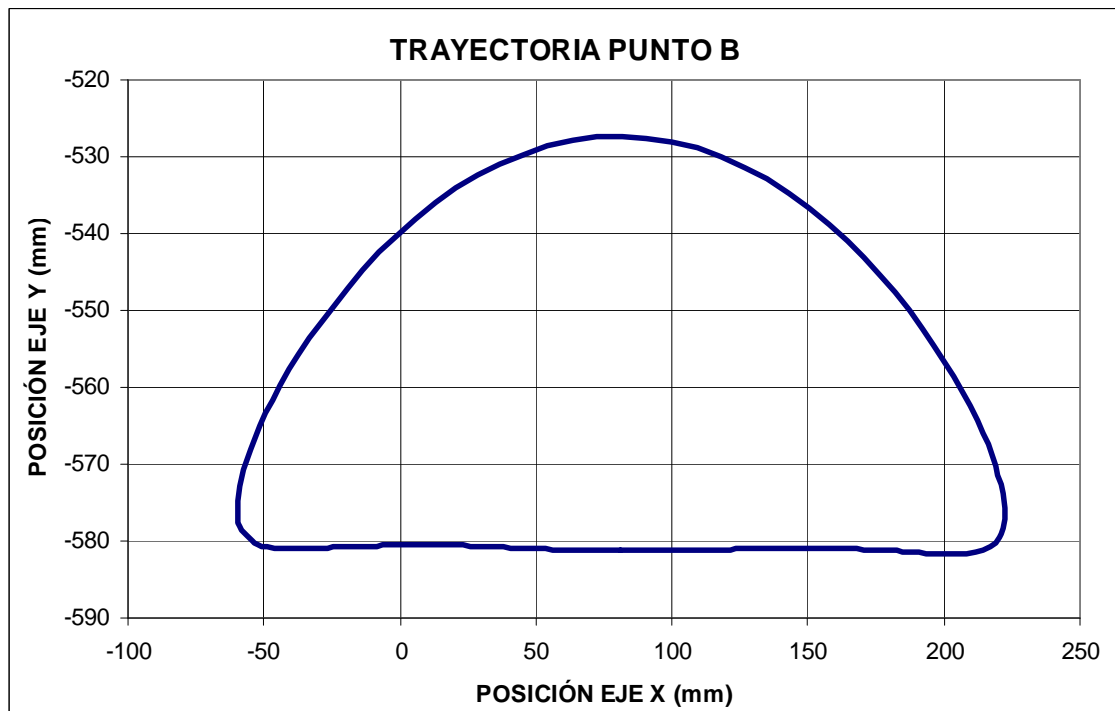


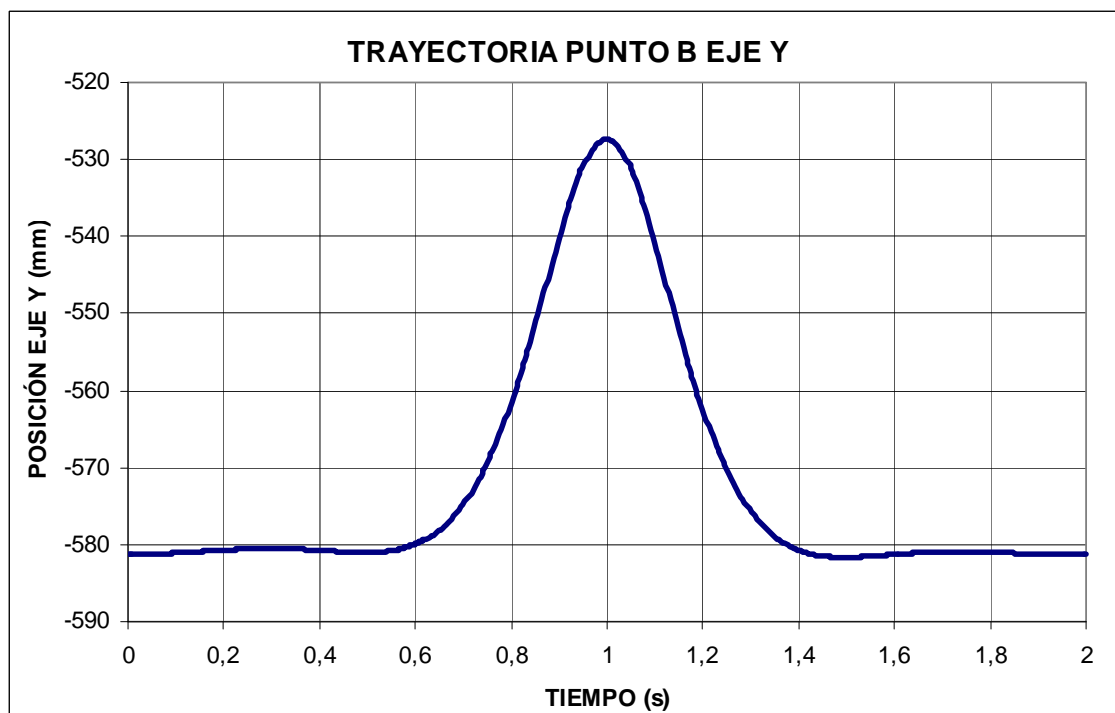
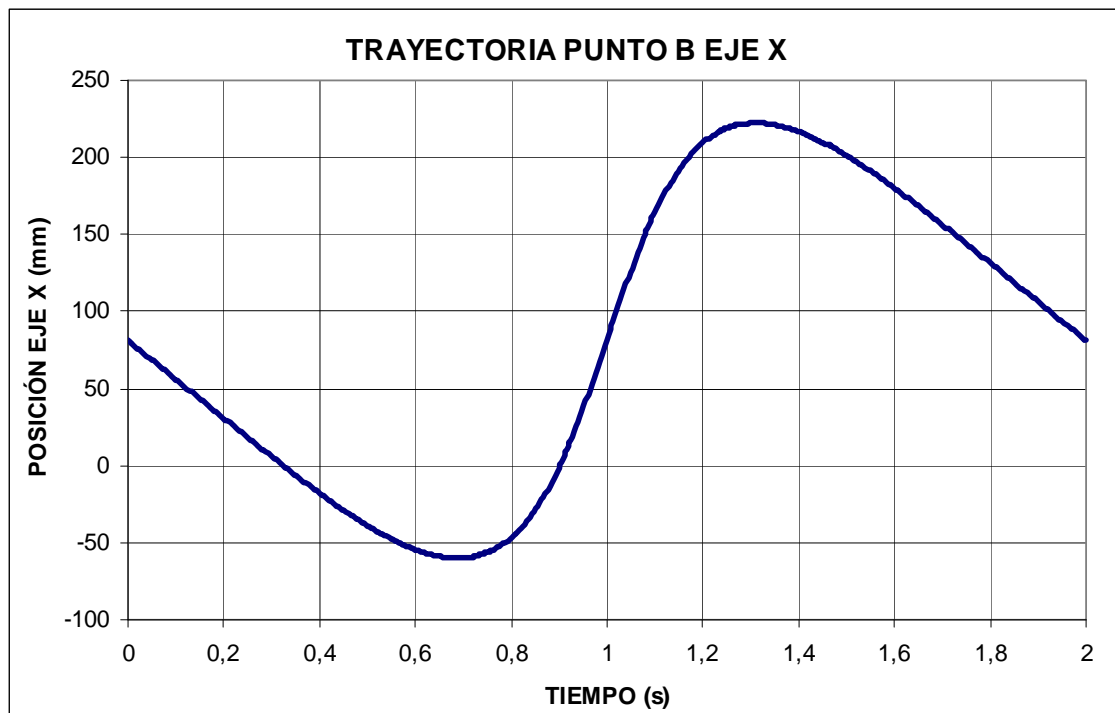
### Punto M



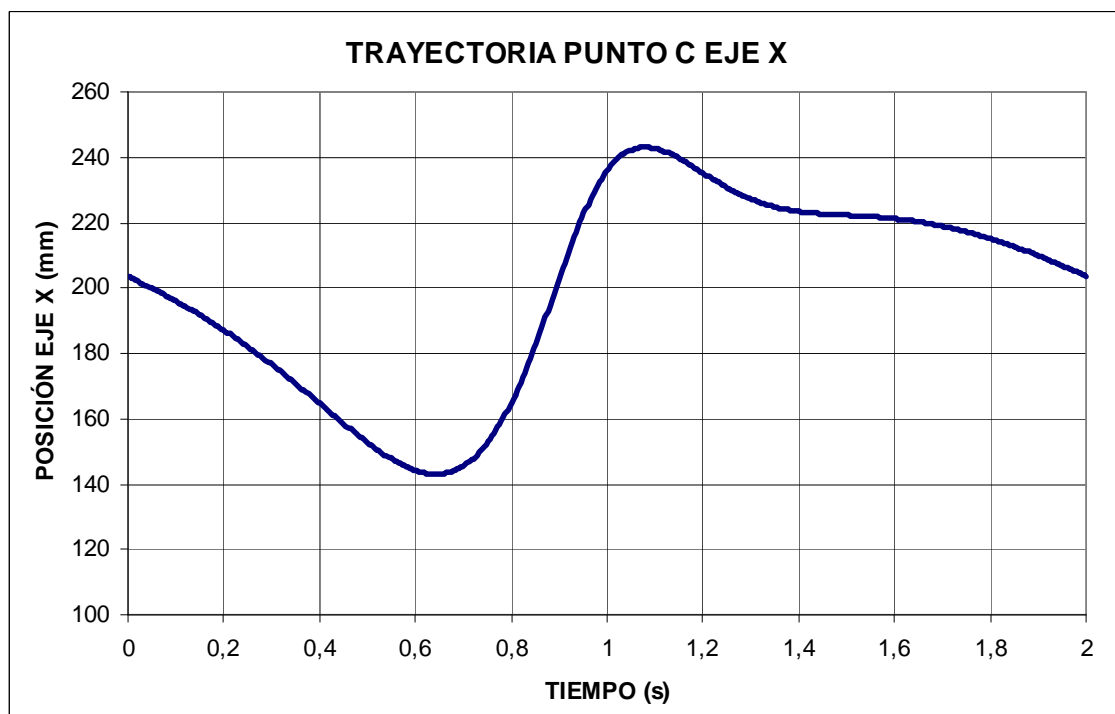
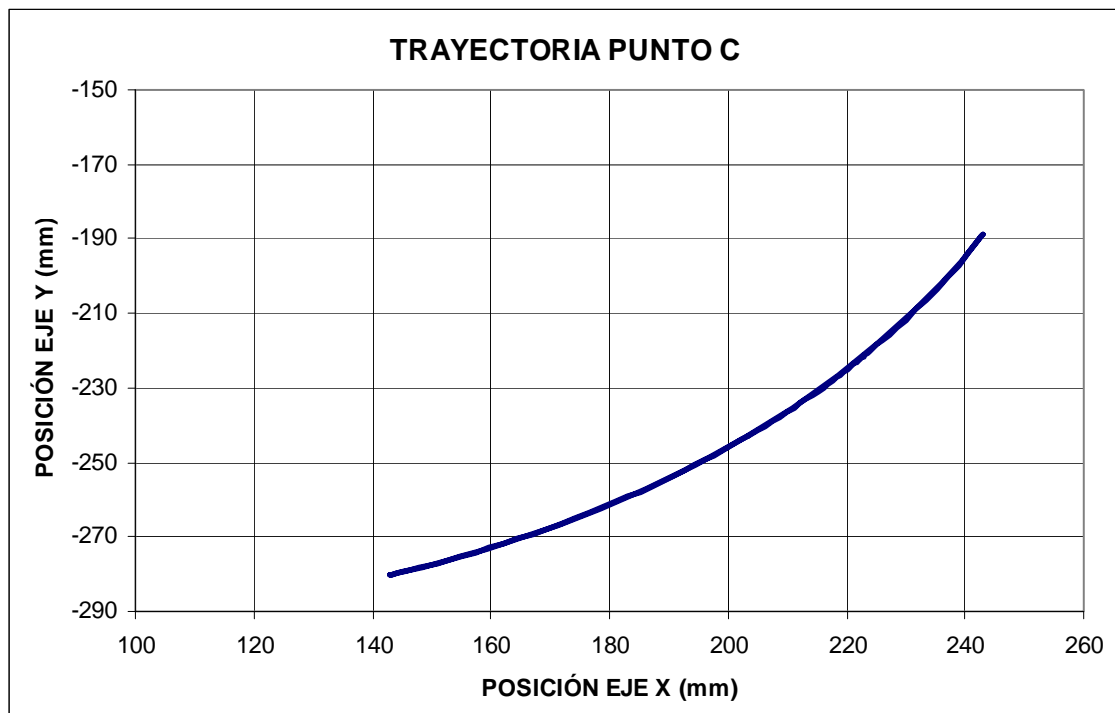
### Trayectorias Pasibot modificado

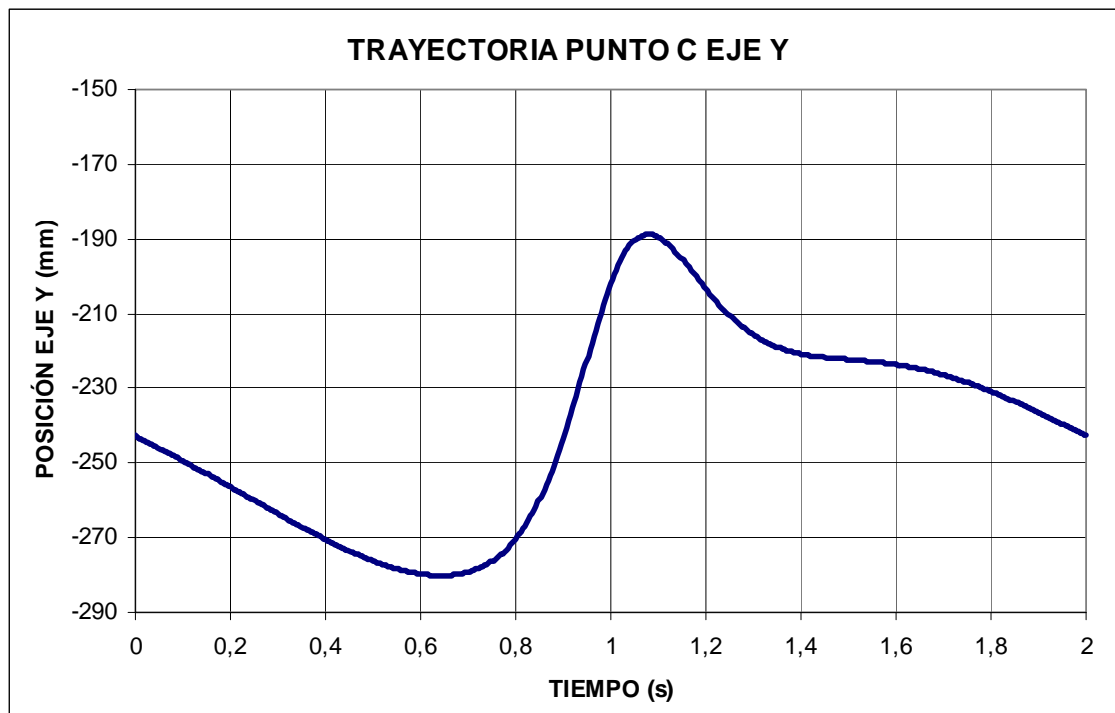
### Punto B



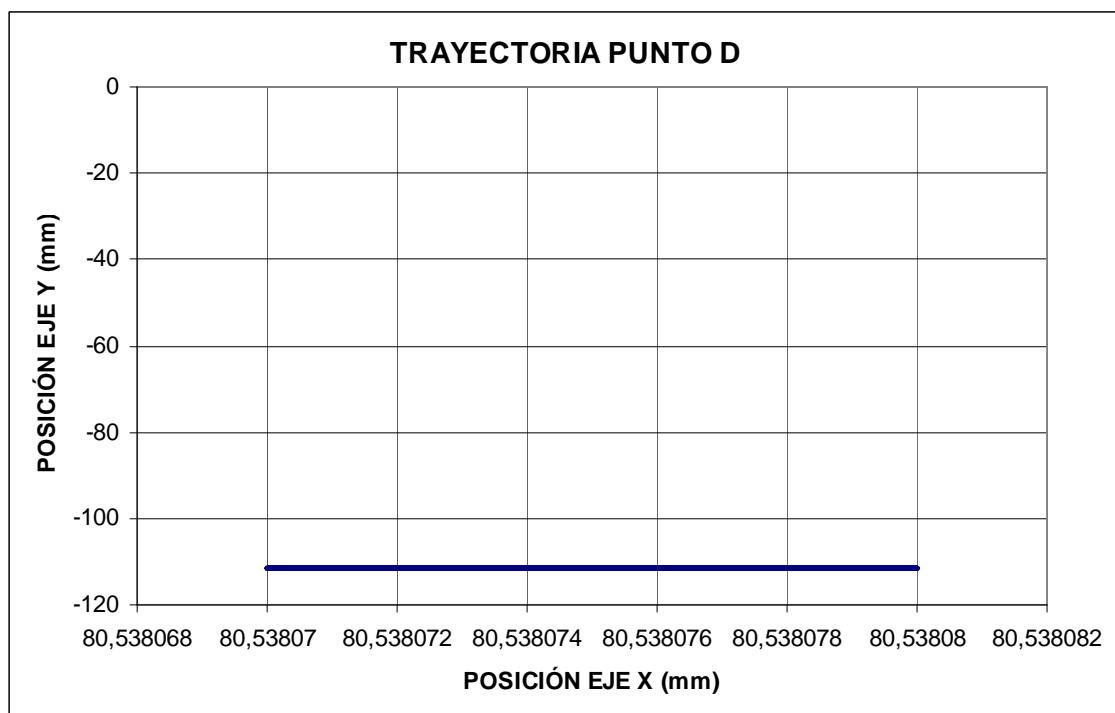


### Punto C

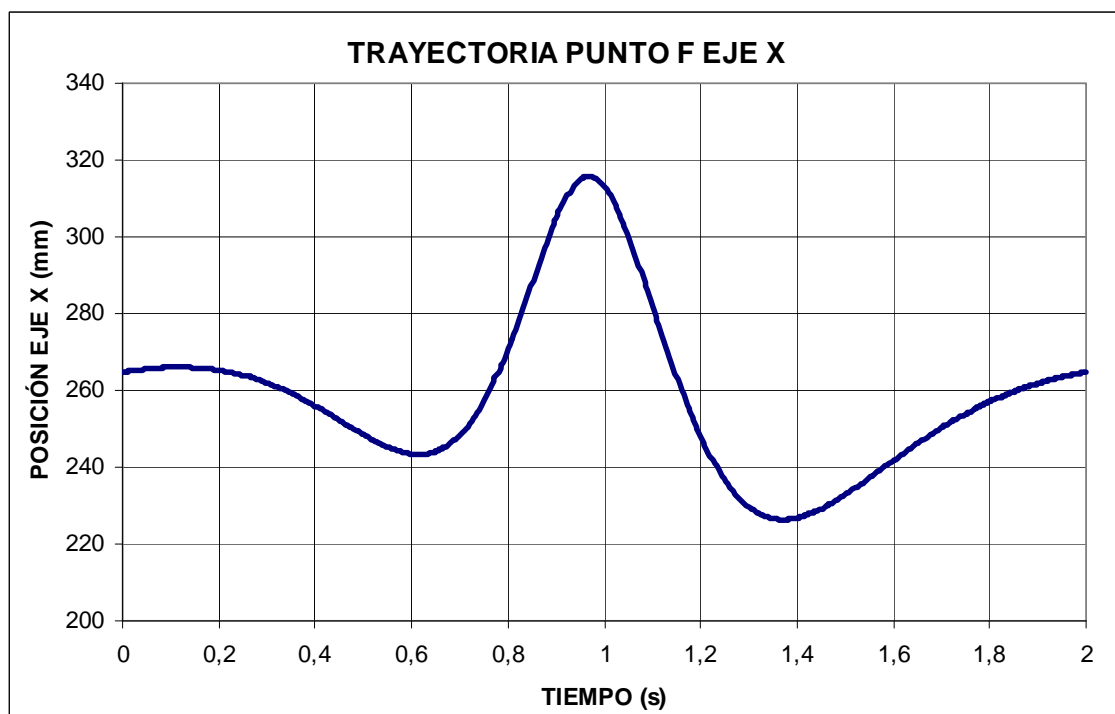
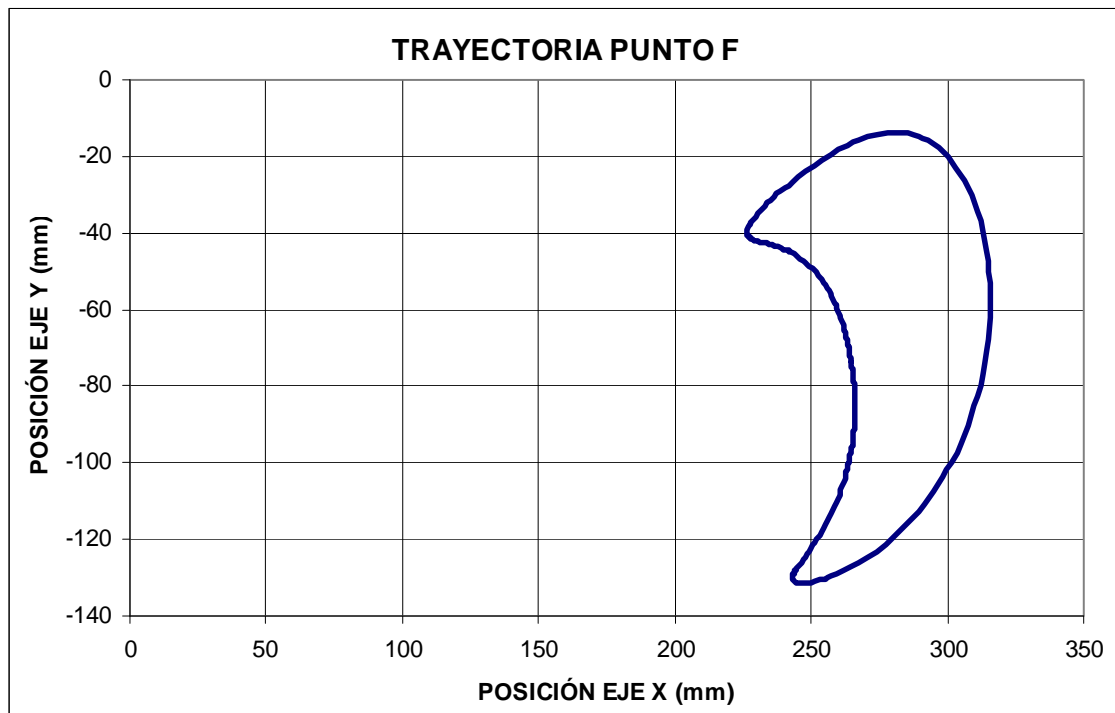


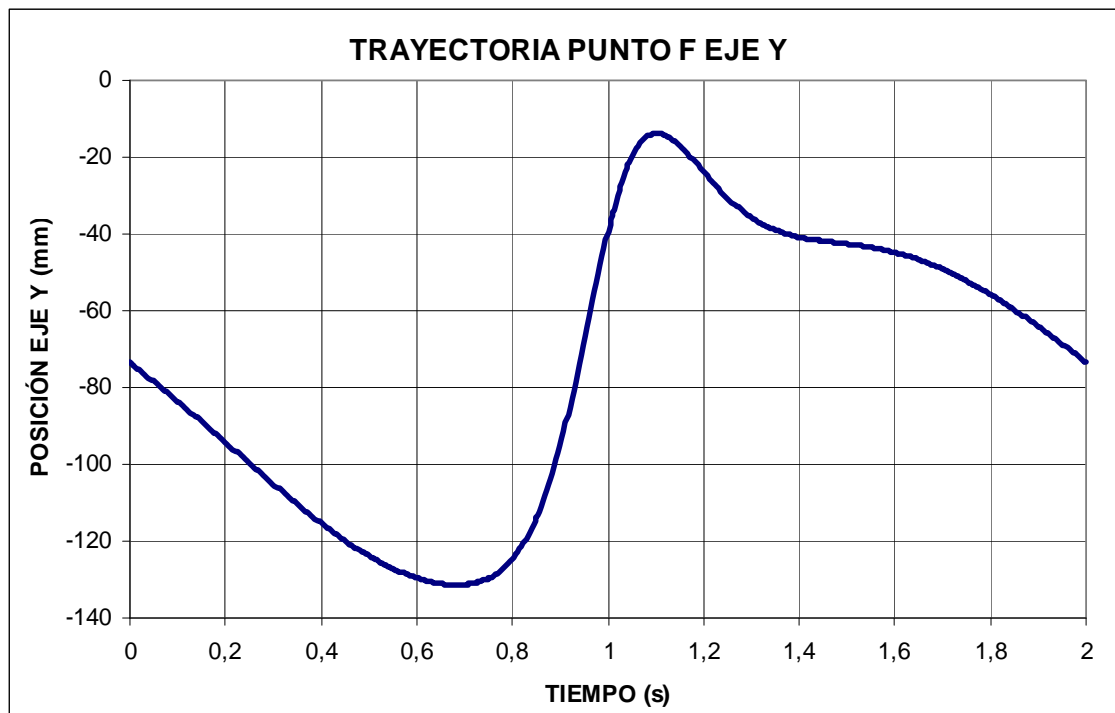


### Punto D

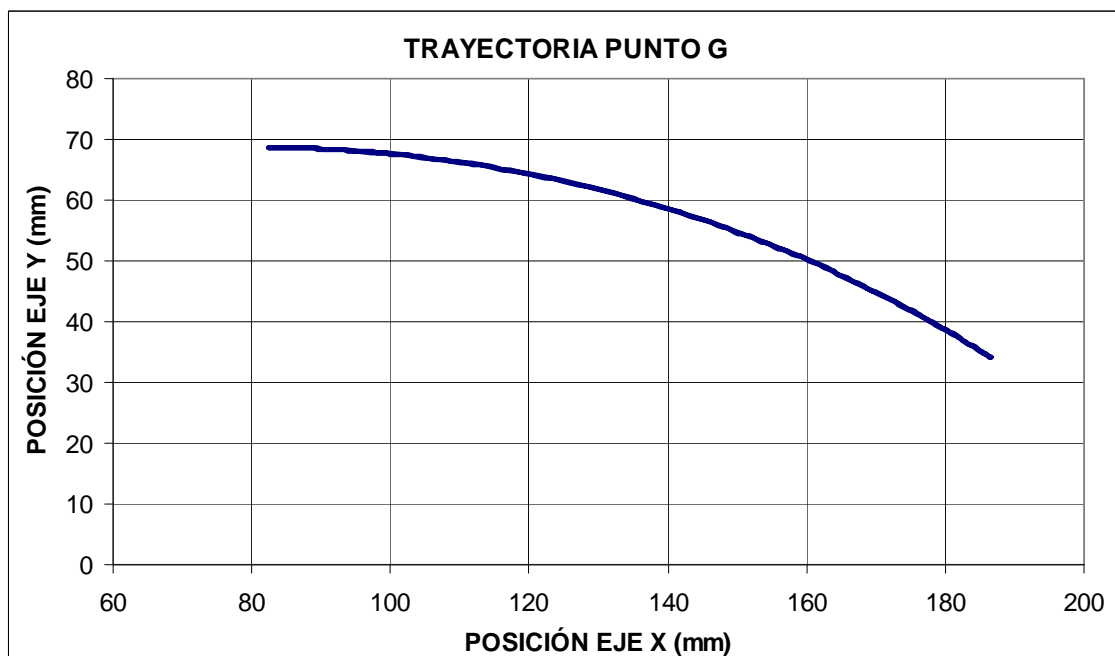


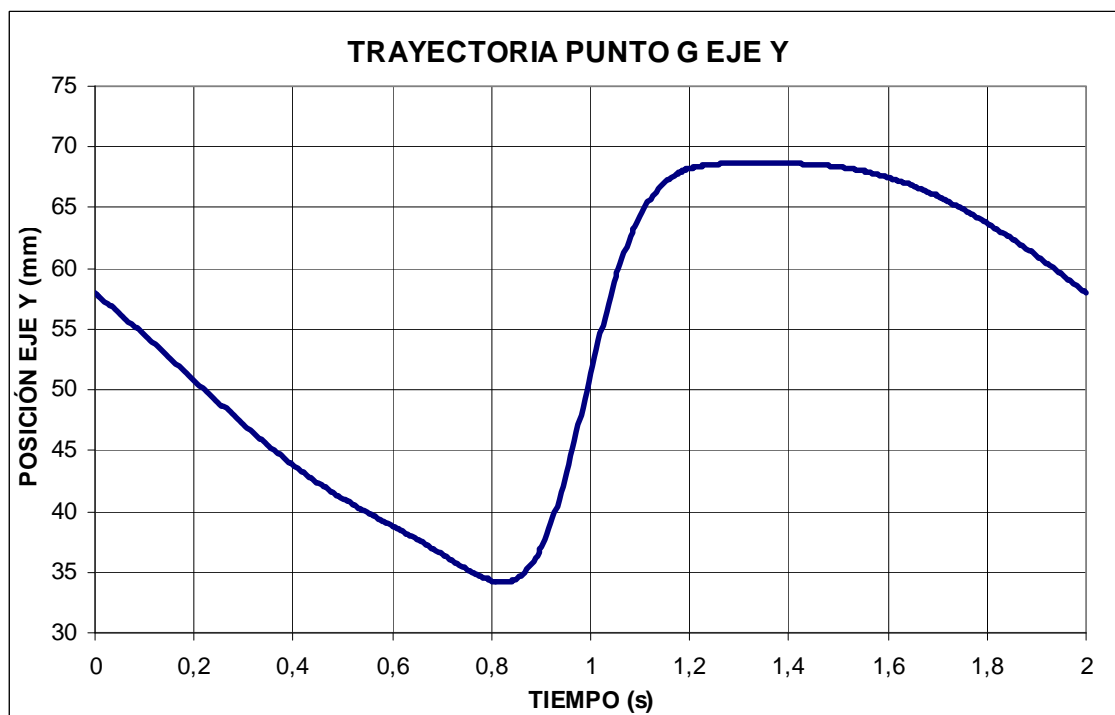
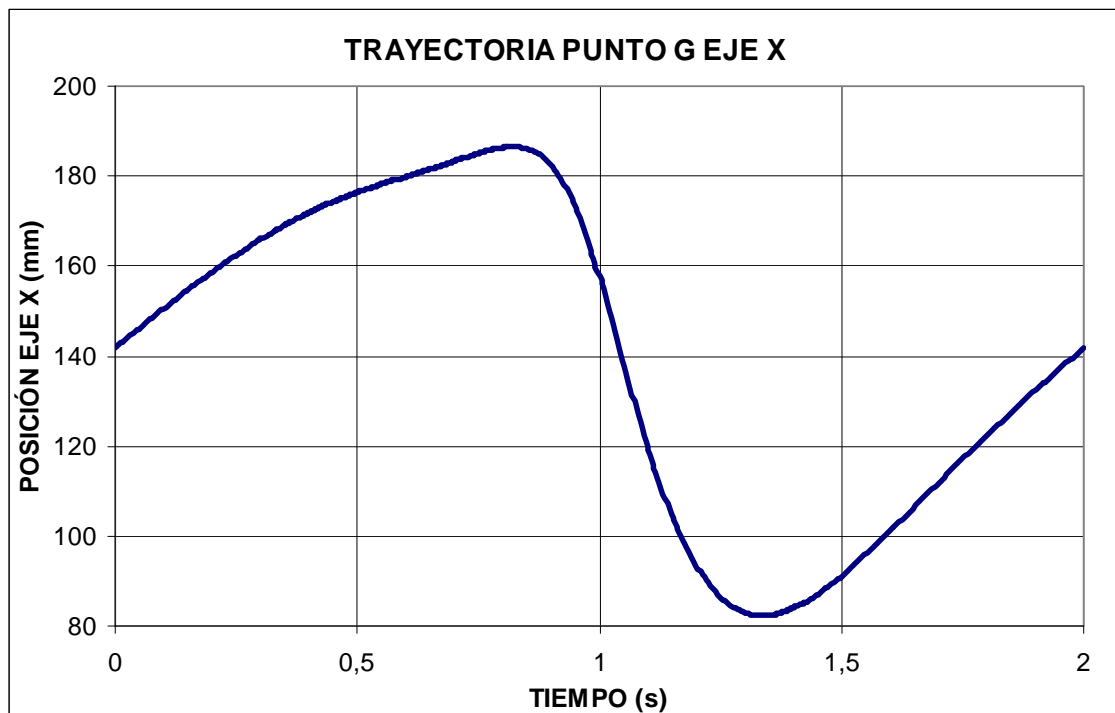
## Punto F





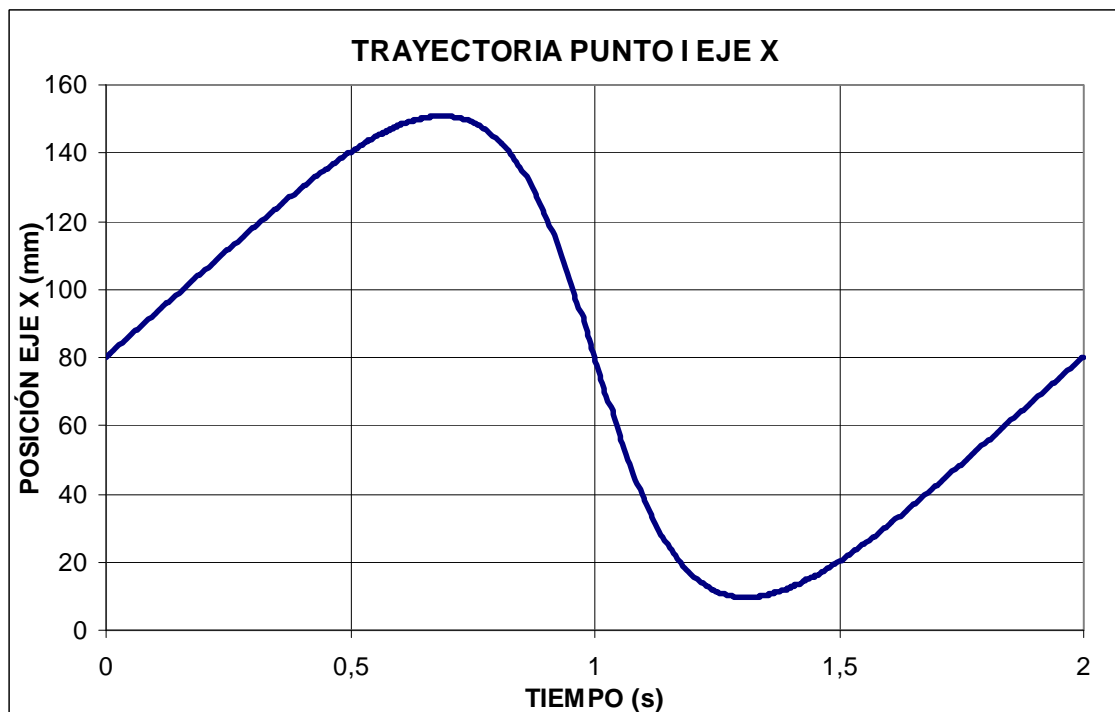
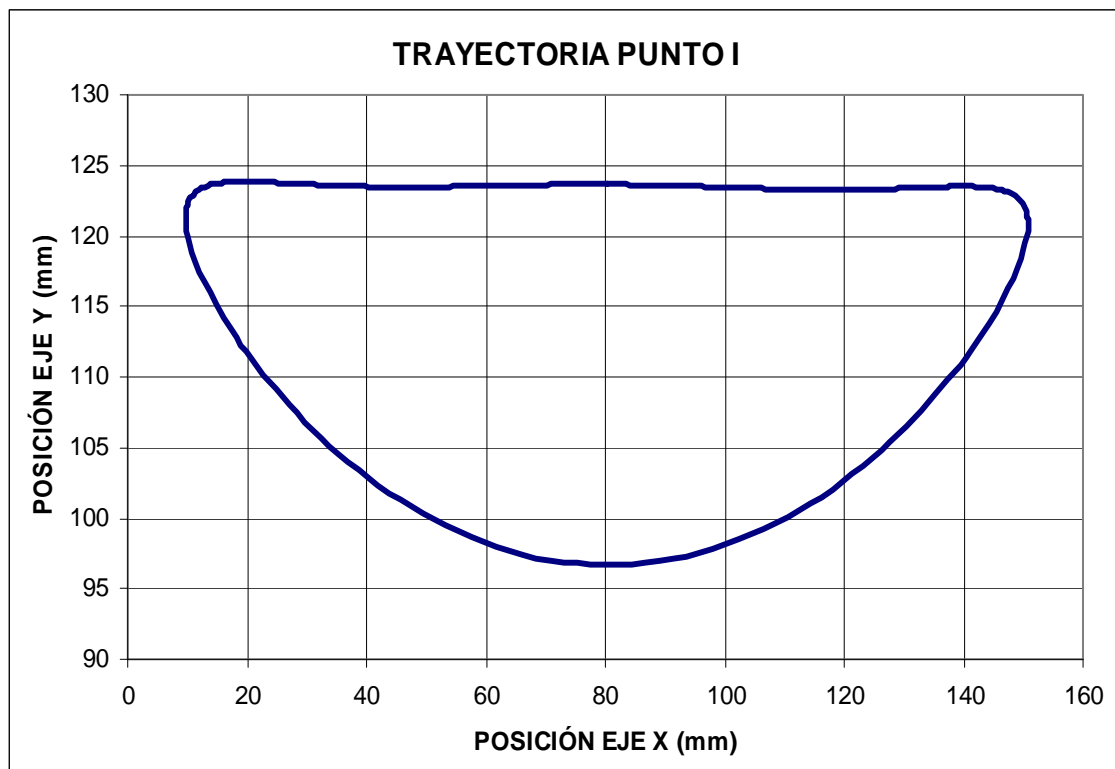
### Punto G

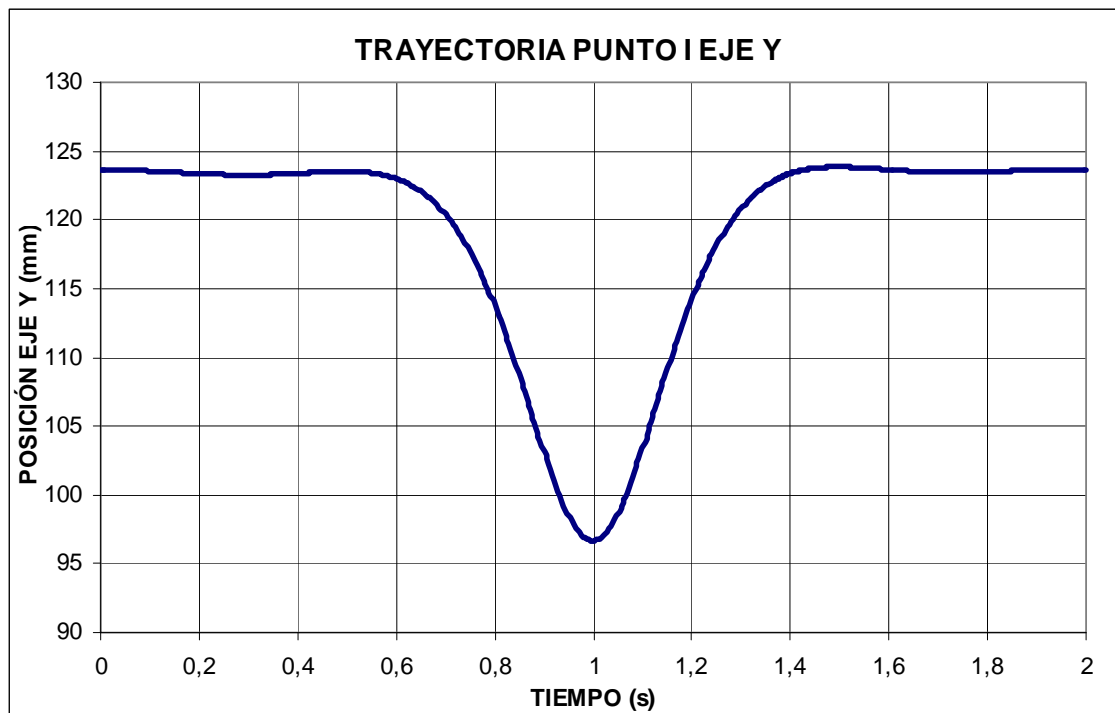




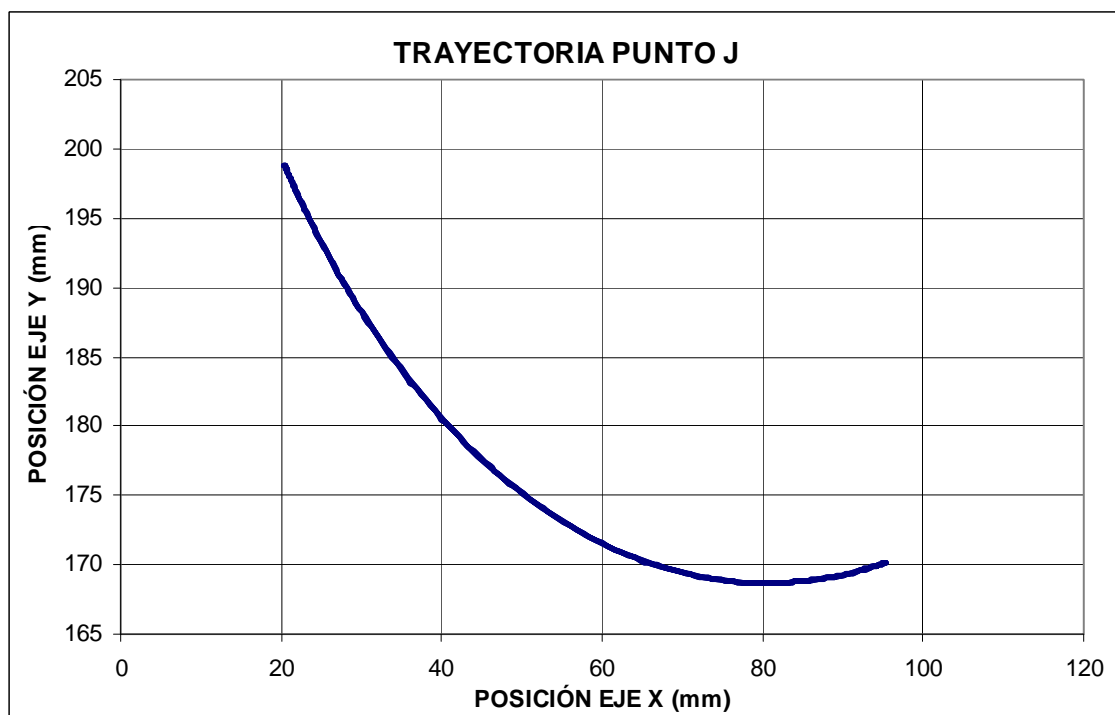
### Punto I

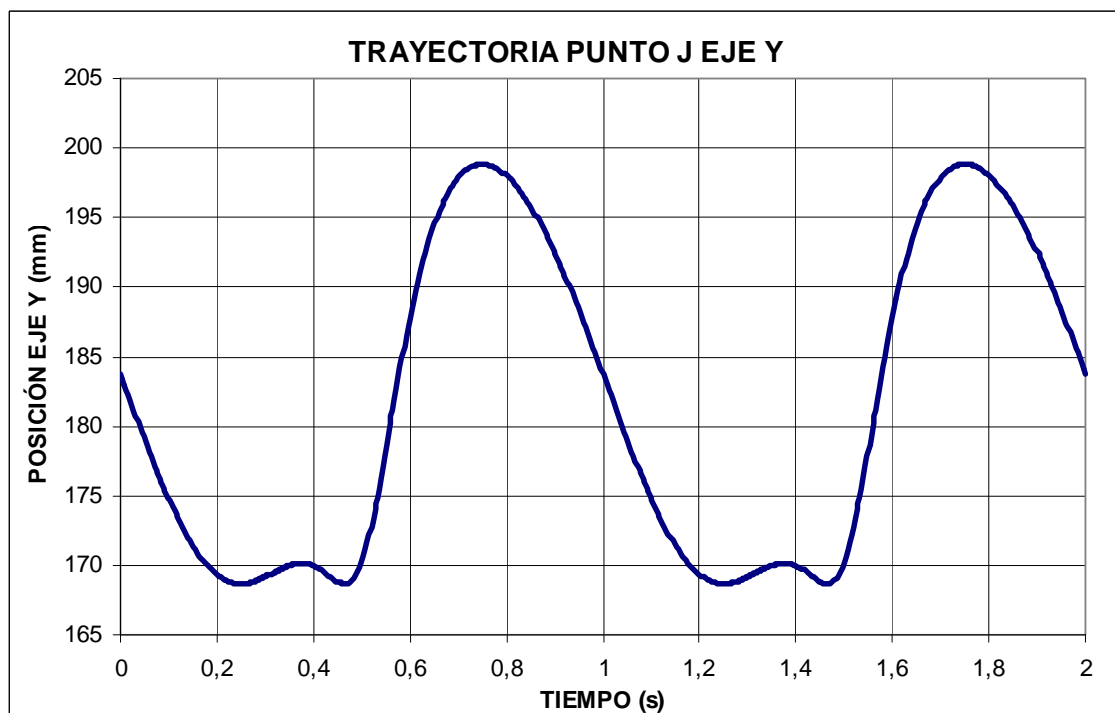
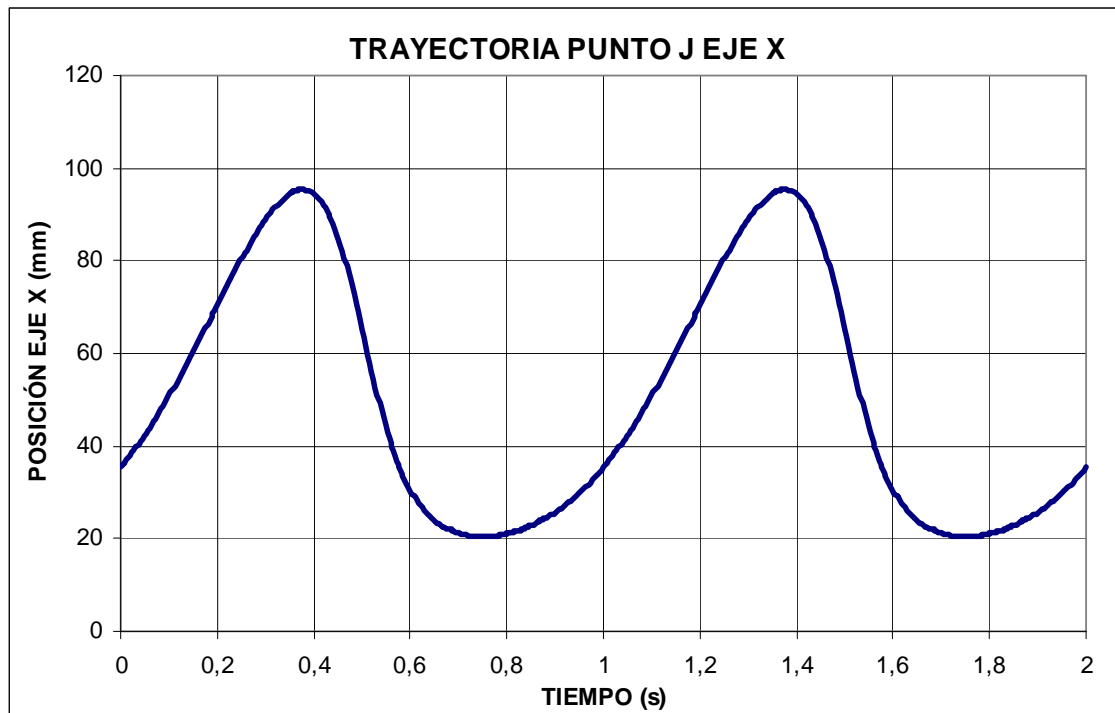




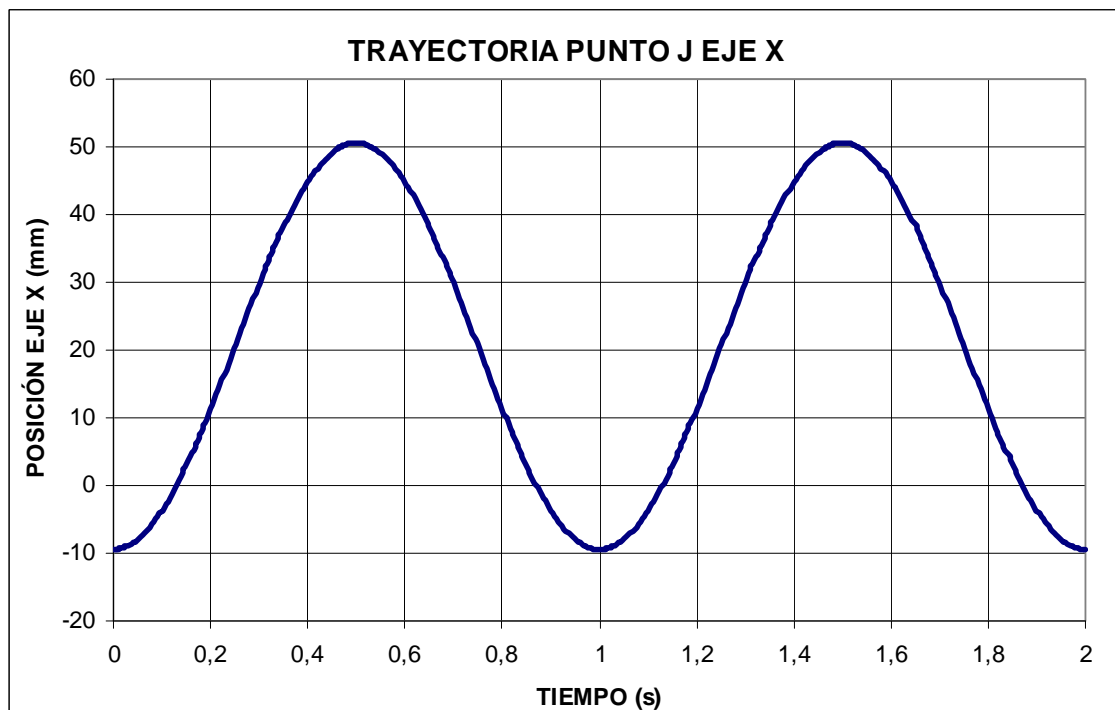
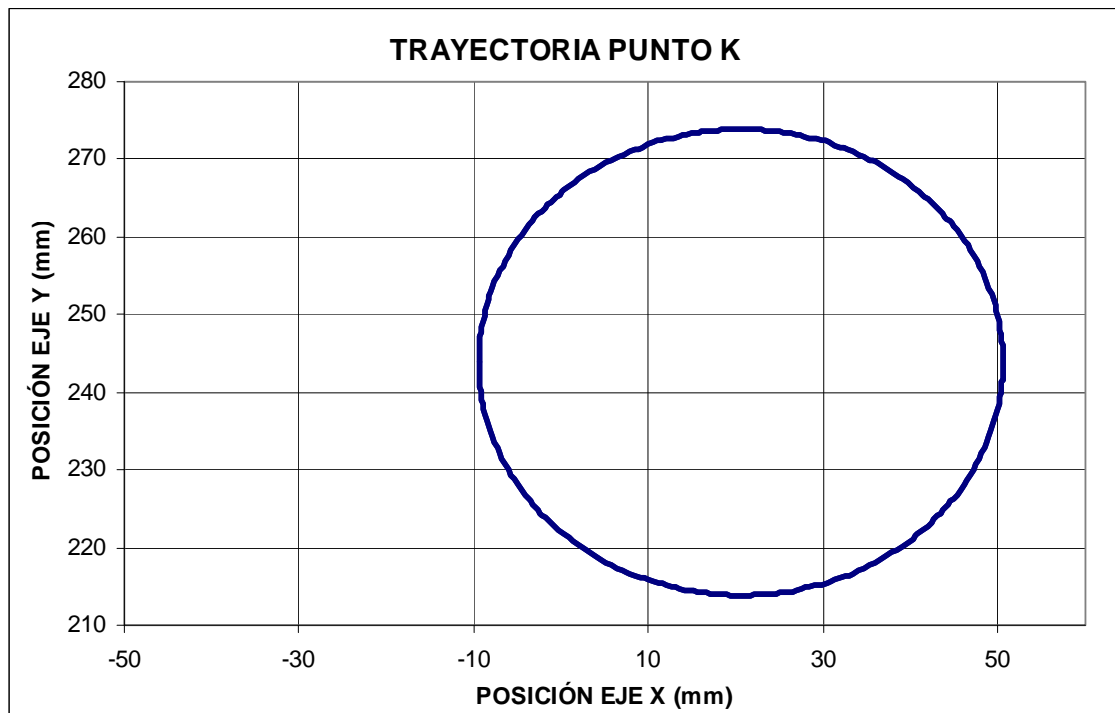


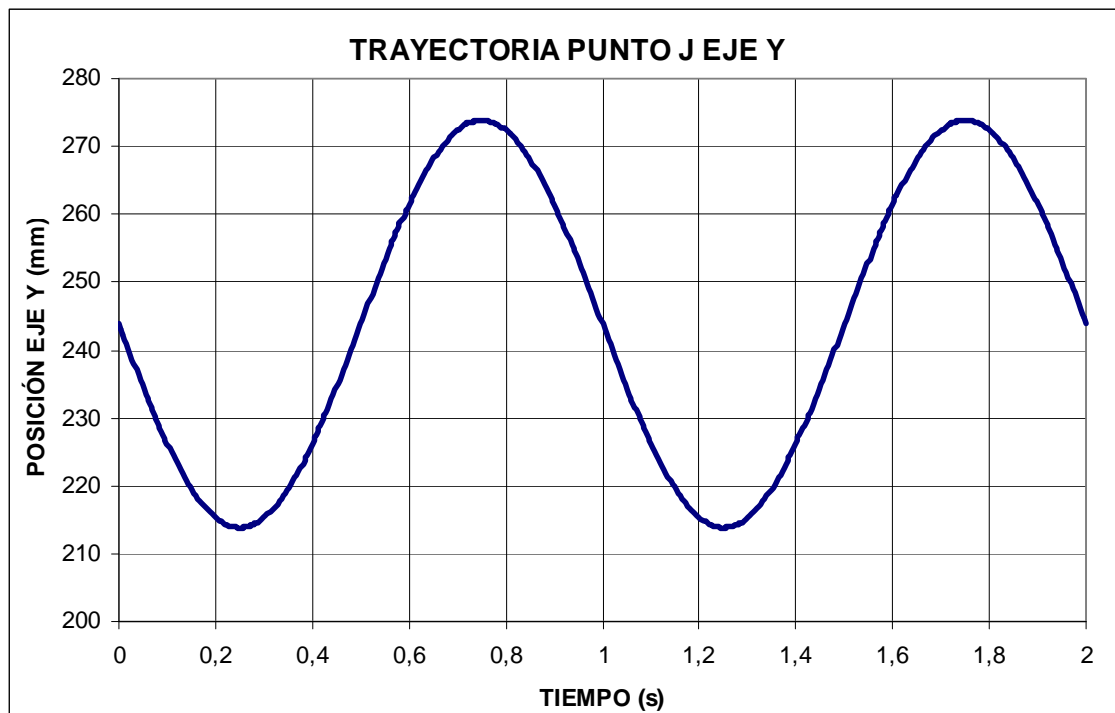
### Punto J



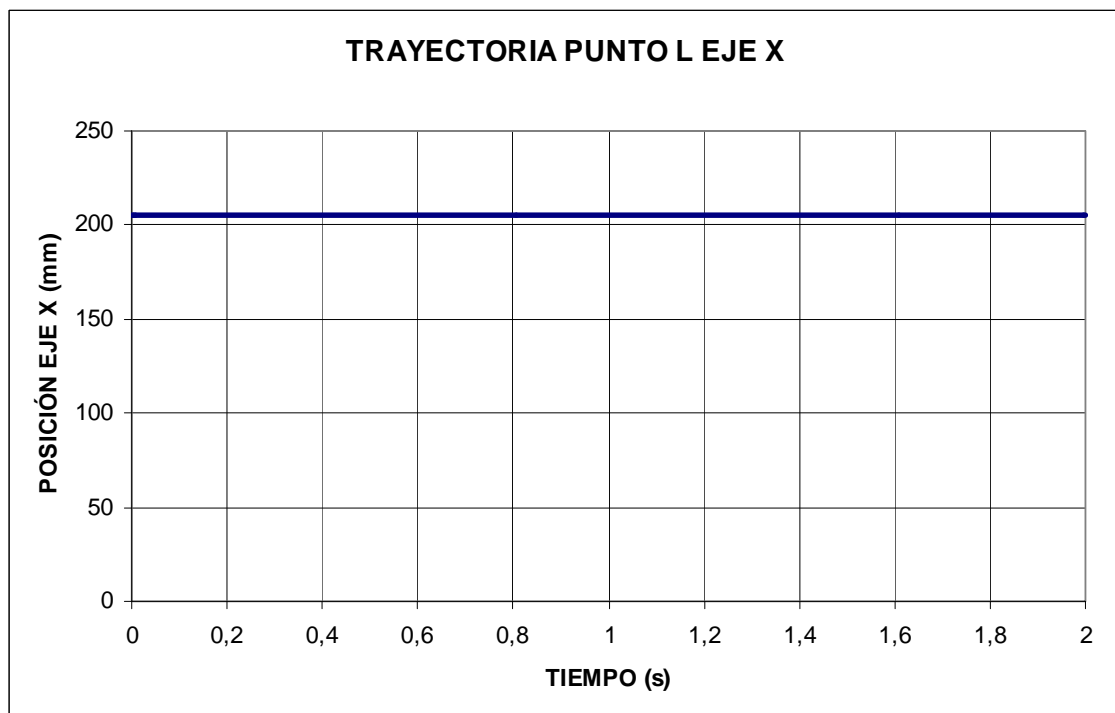


### Punto K

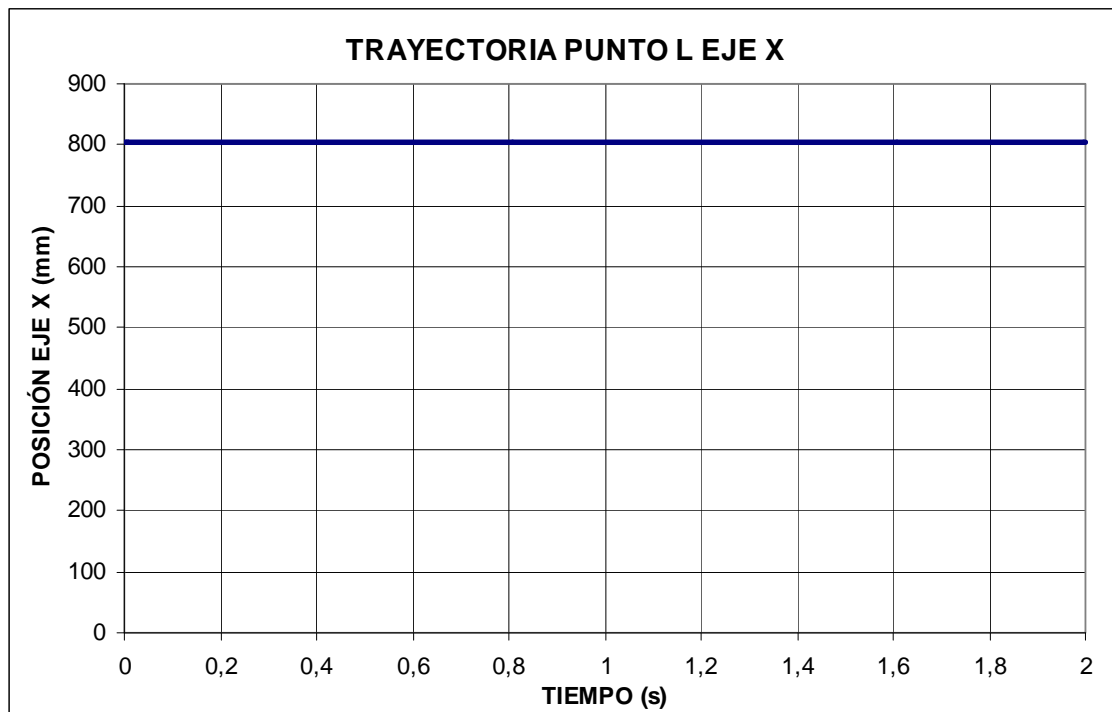




### Punto L

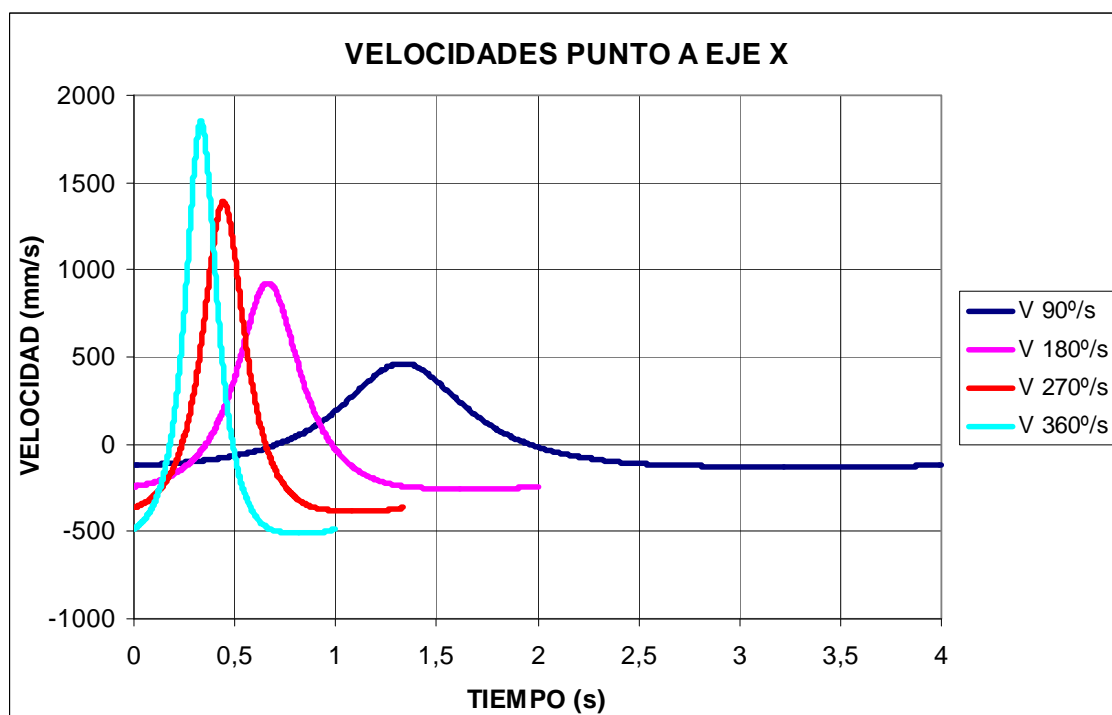


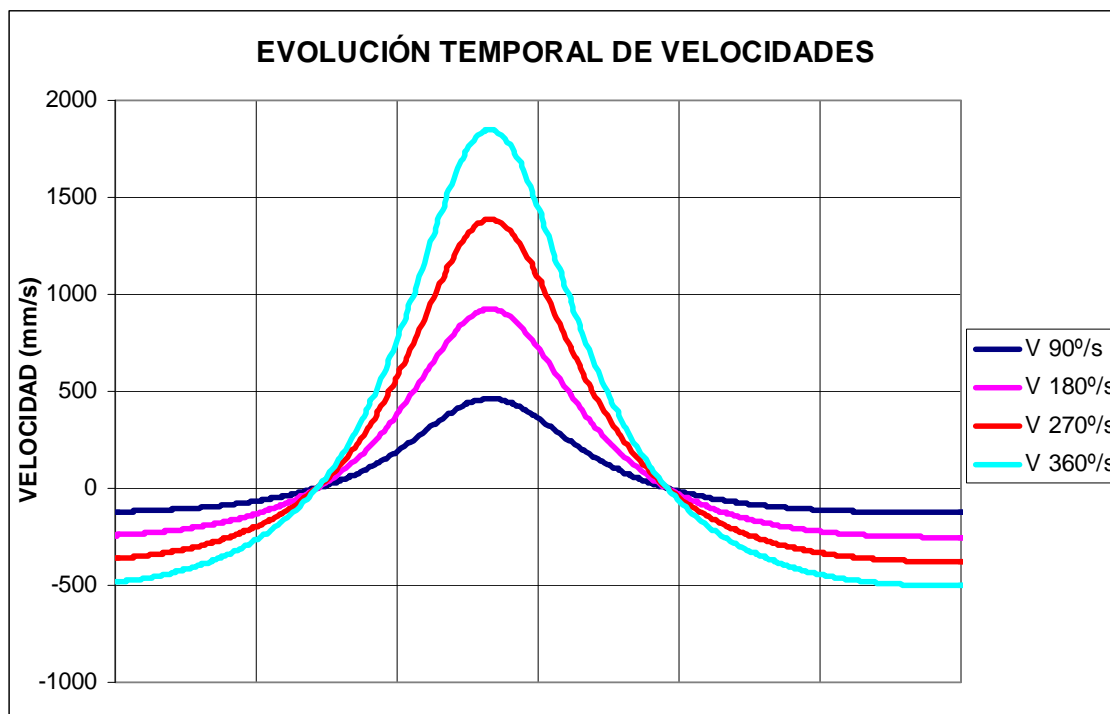
### Punto M



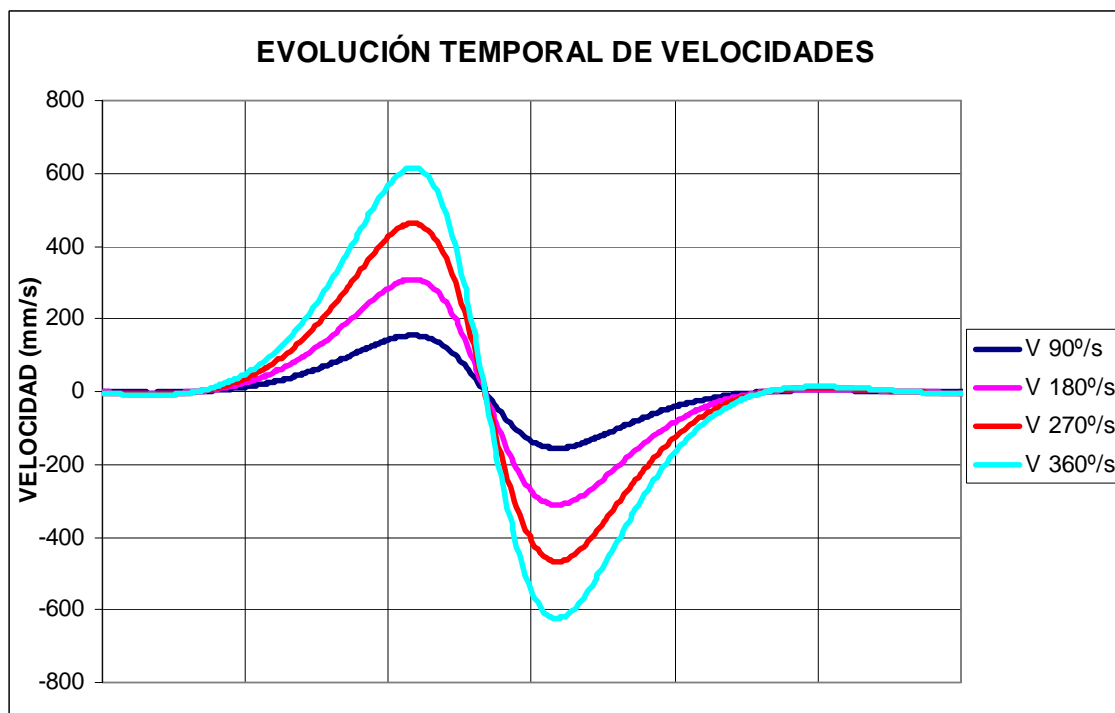
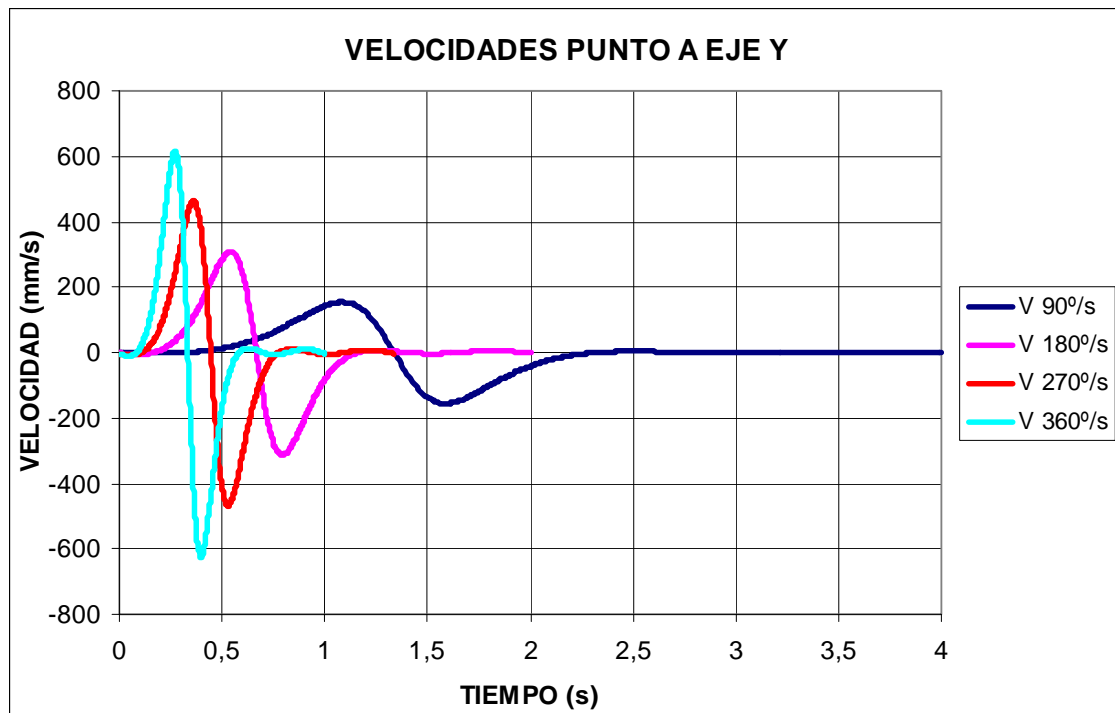
### Velocidades

#### Punto A eje X (Modelo original)



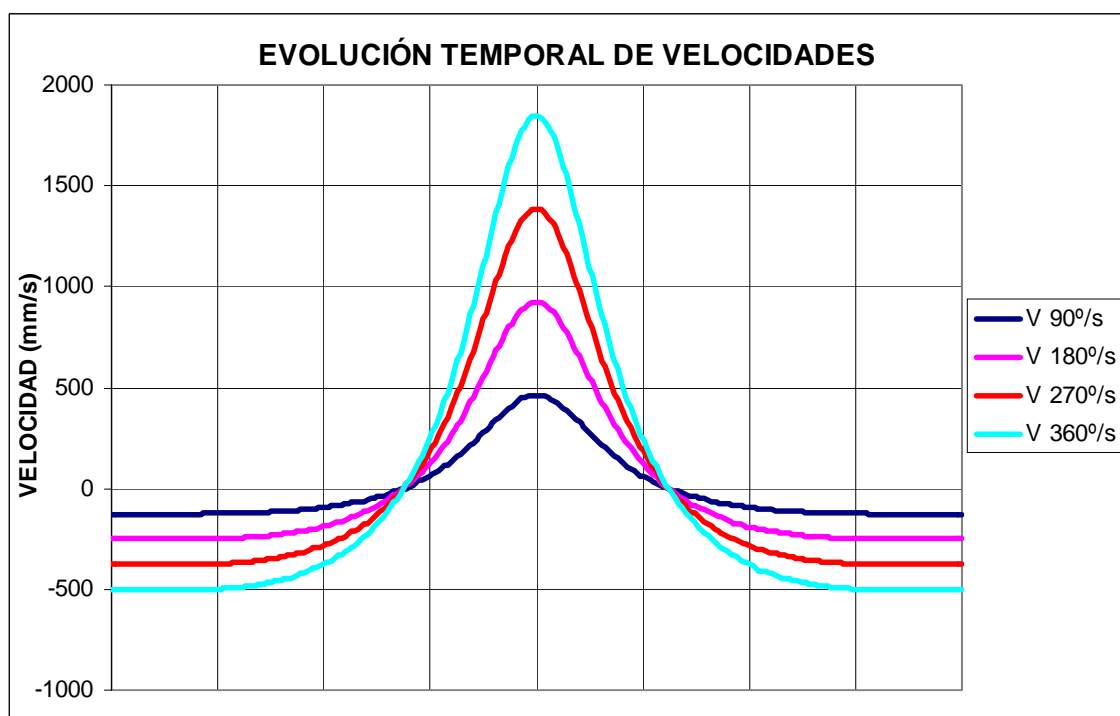
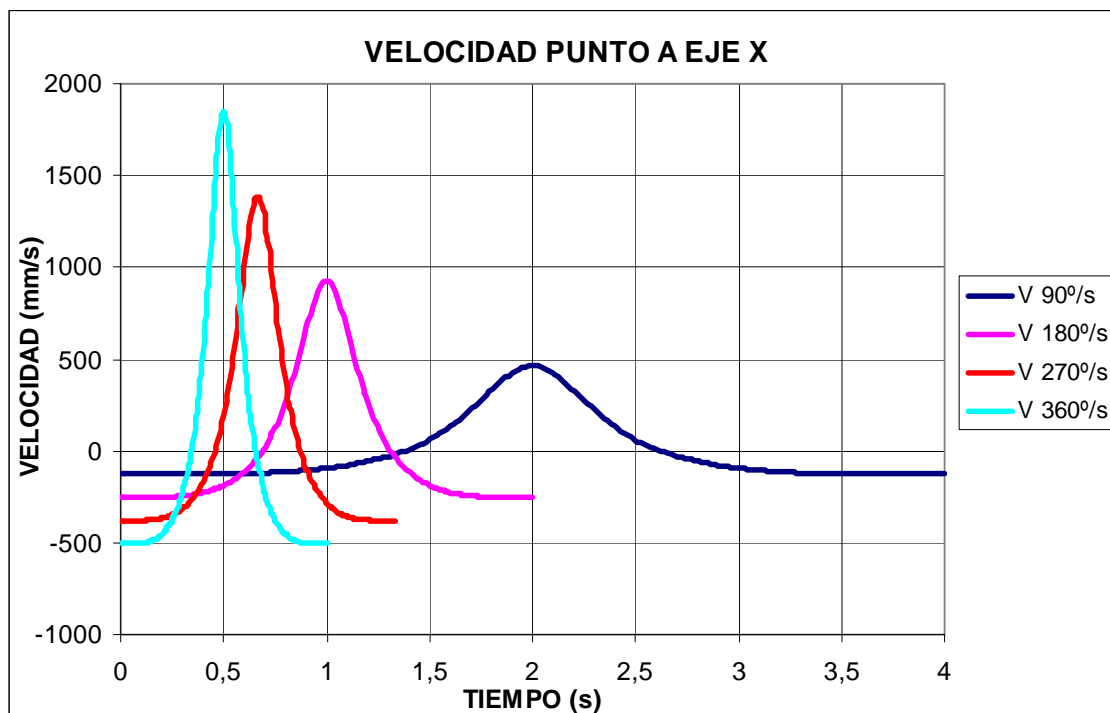


**Punto A eje Y (Modelo original)**

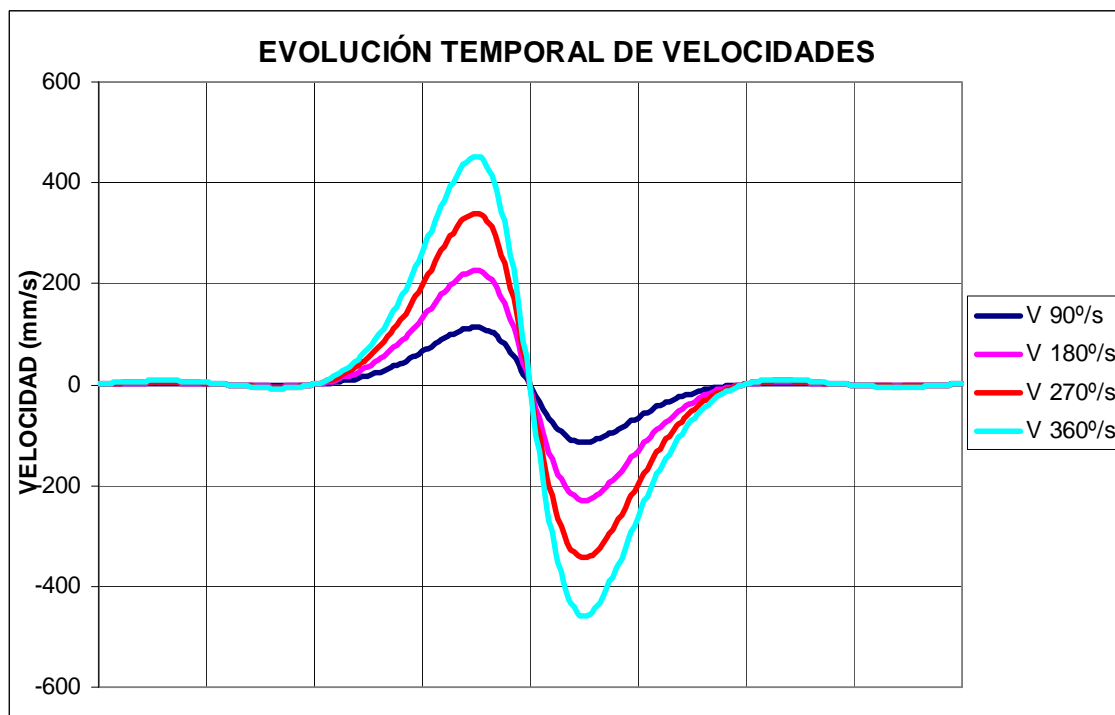
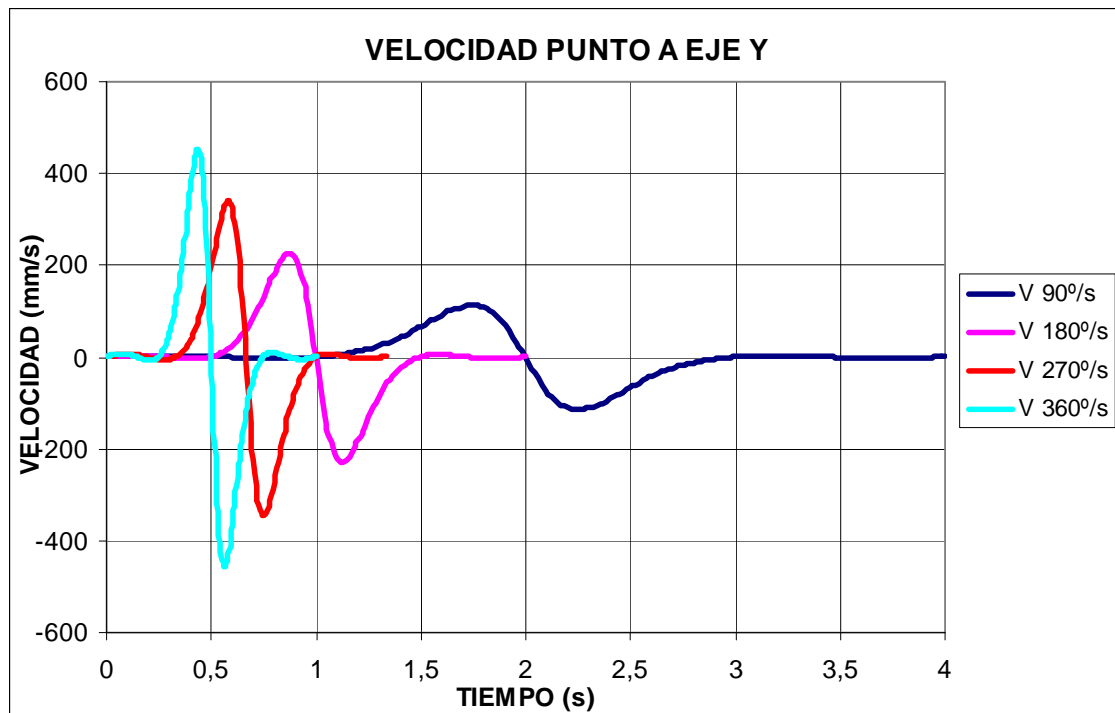




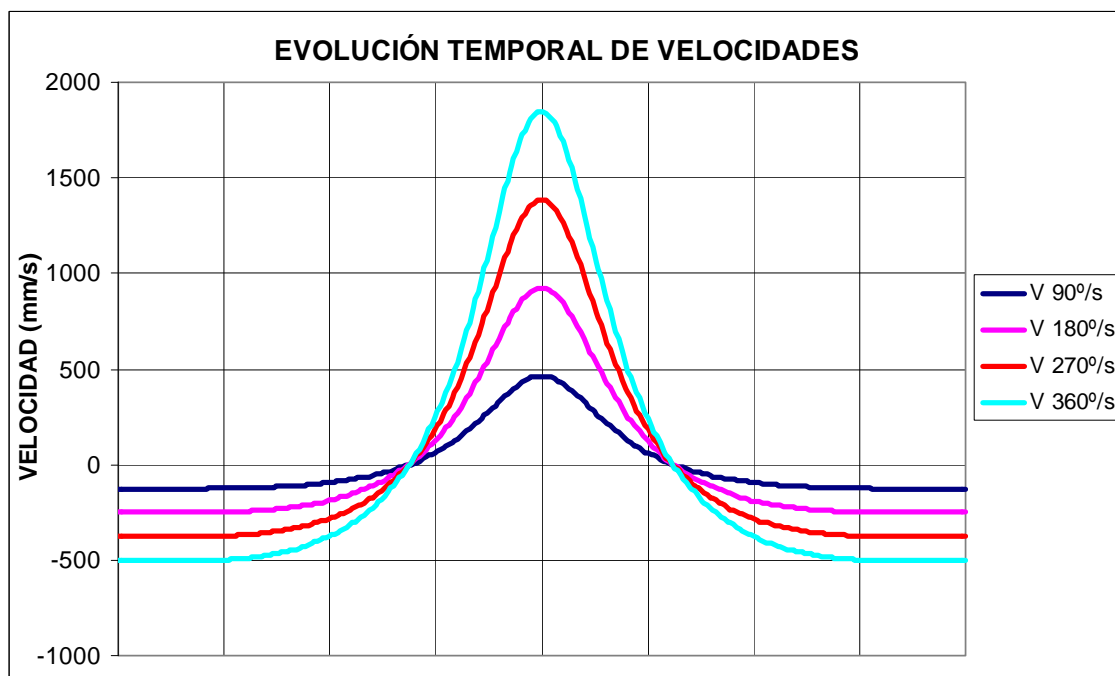
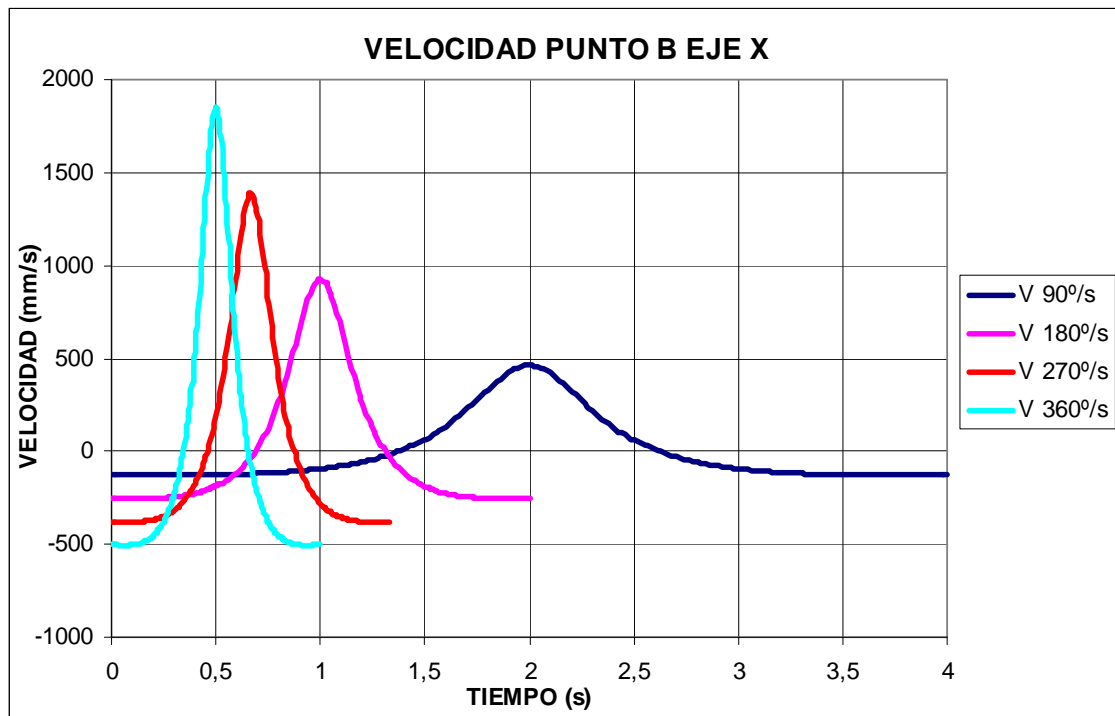
### Punto A eje X (Modelo modificado)



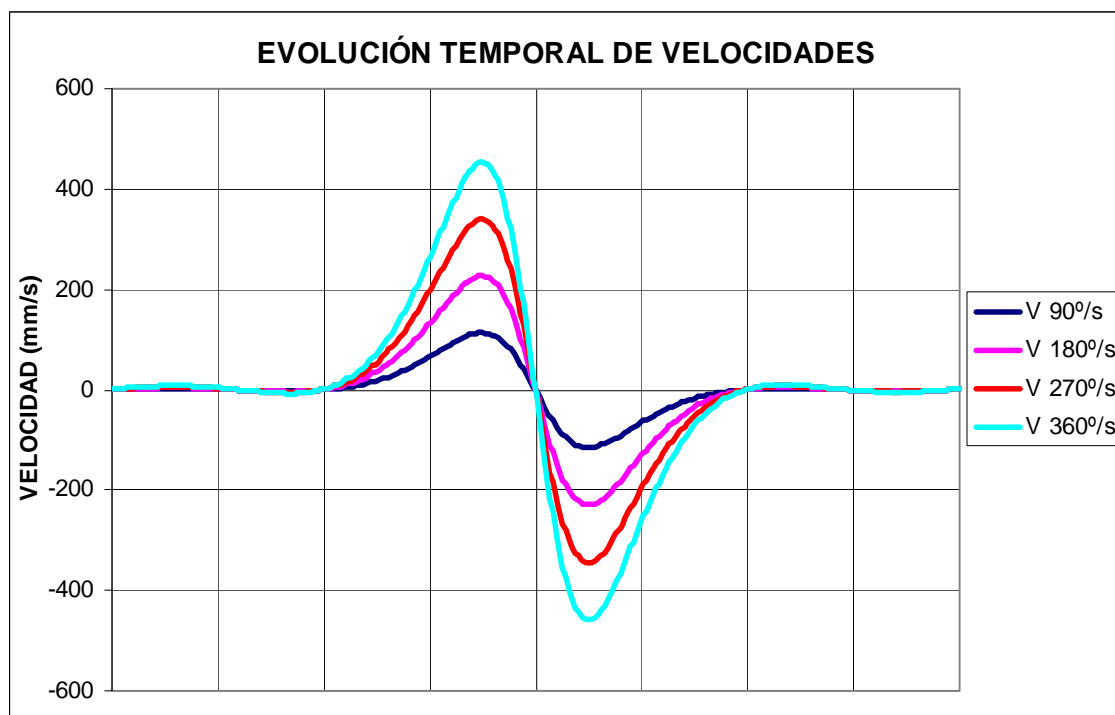
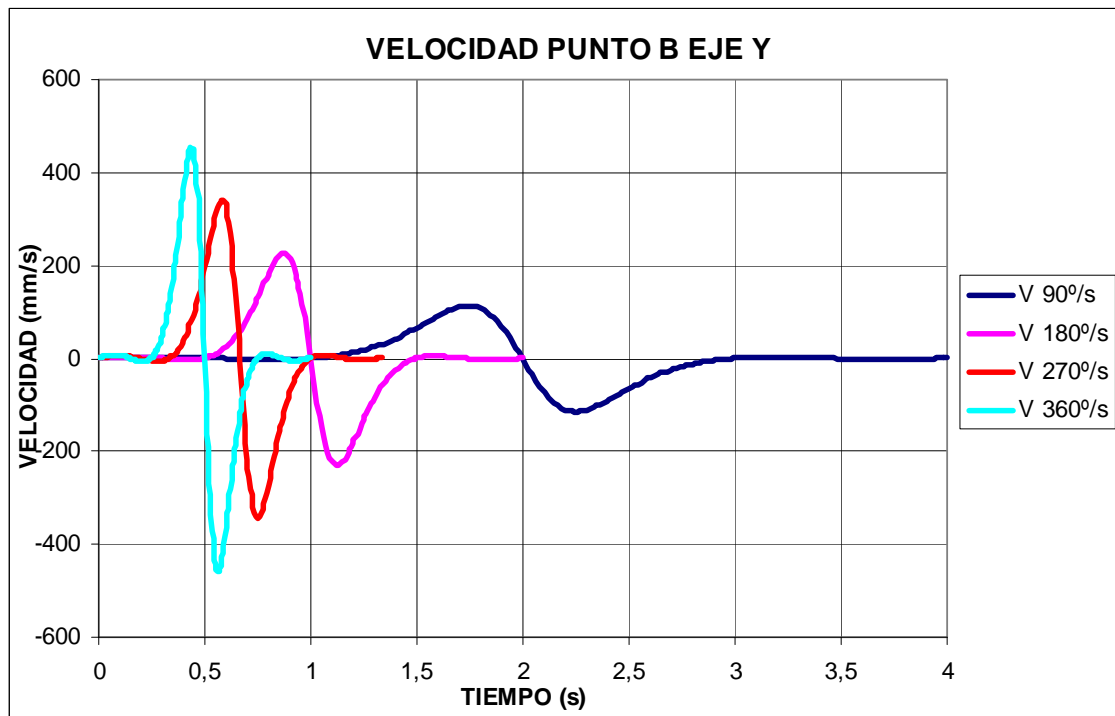
**Punto A eje Y (Modelo modificado)**



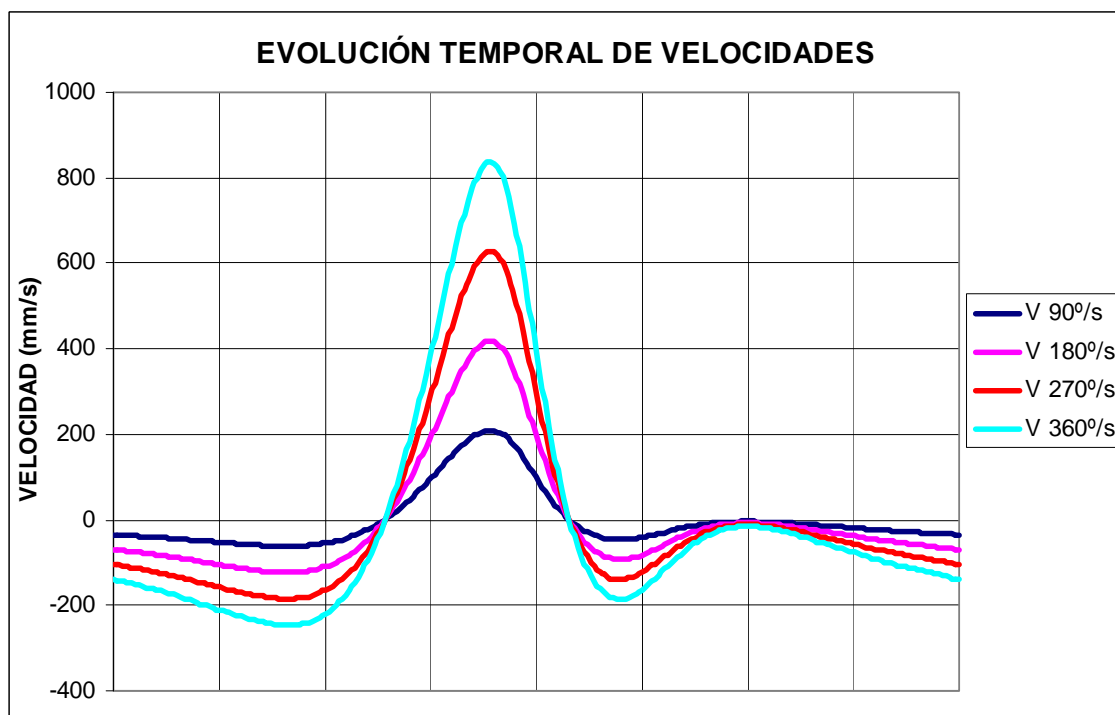
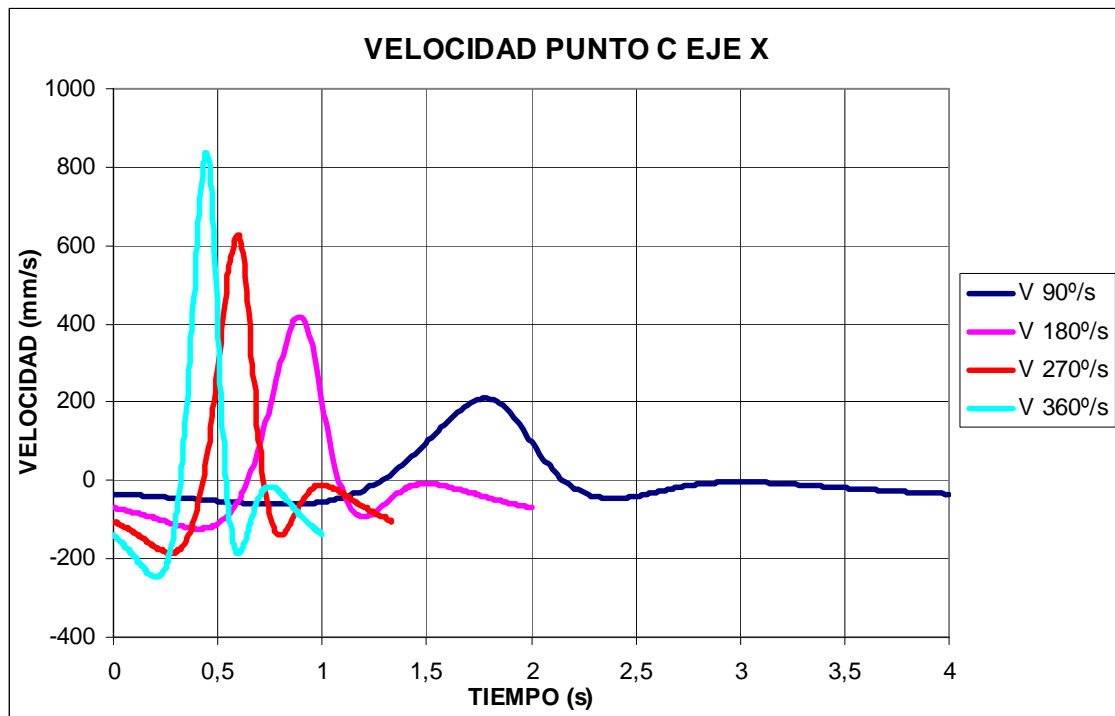
### Punto B eje X



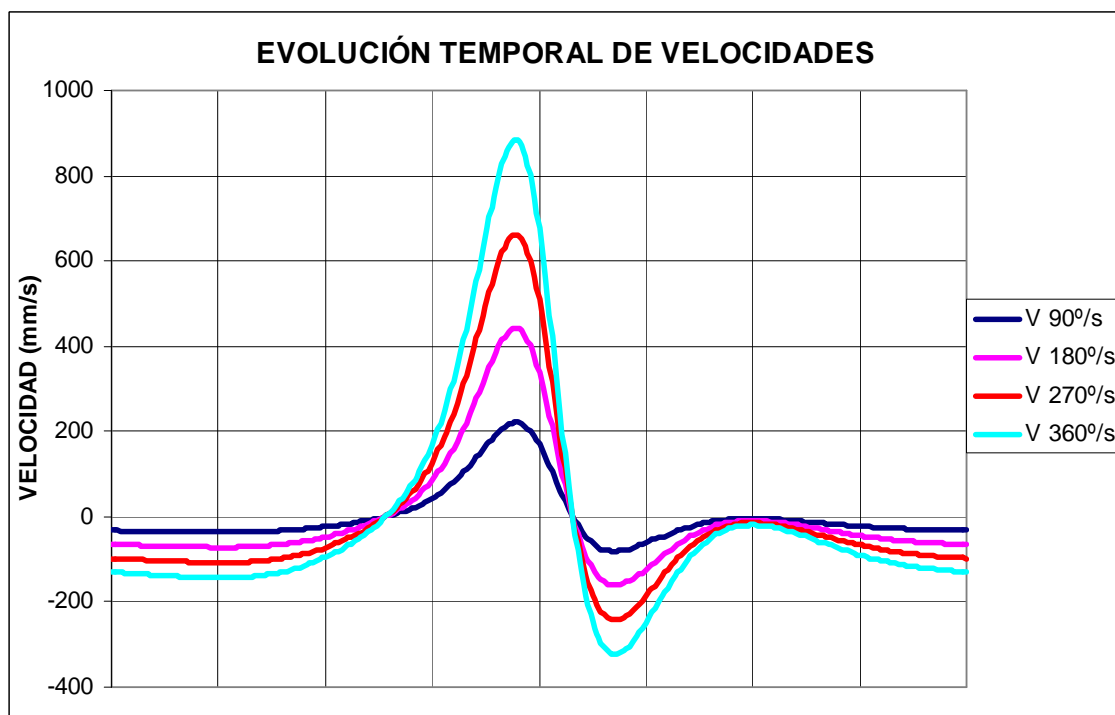
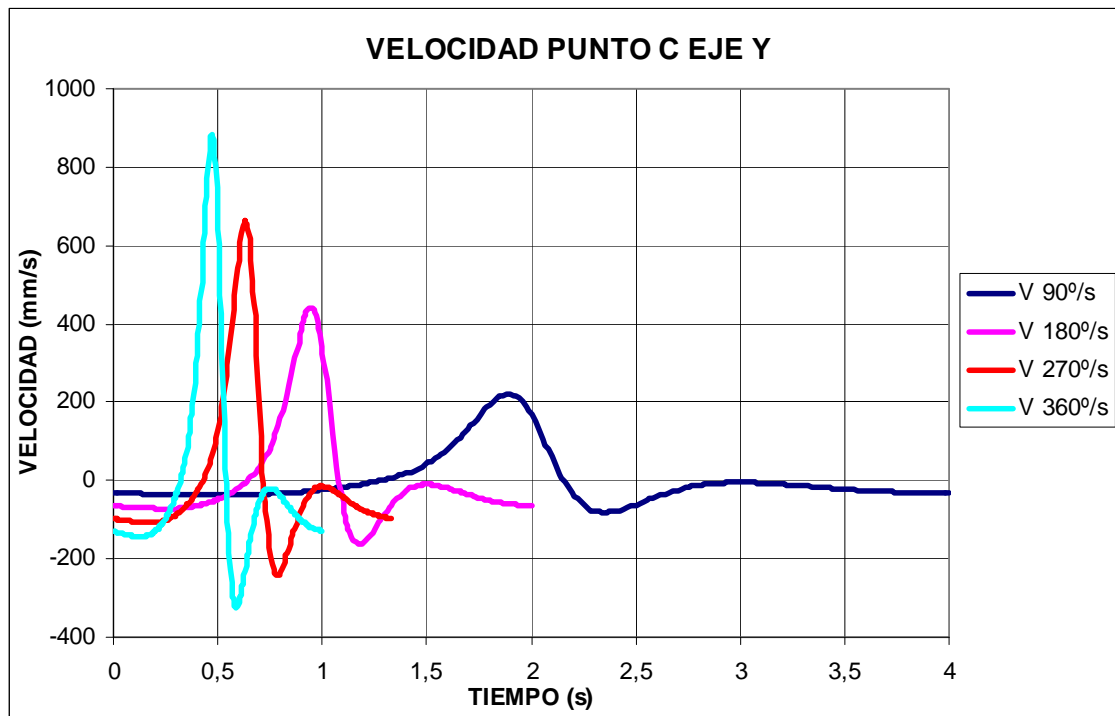
### Punto B eje Y



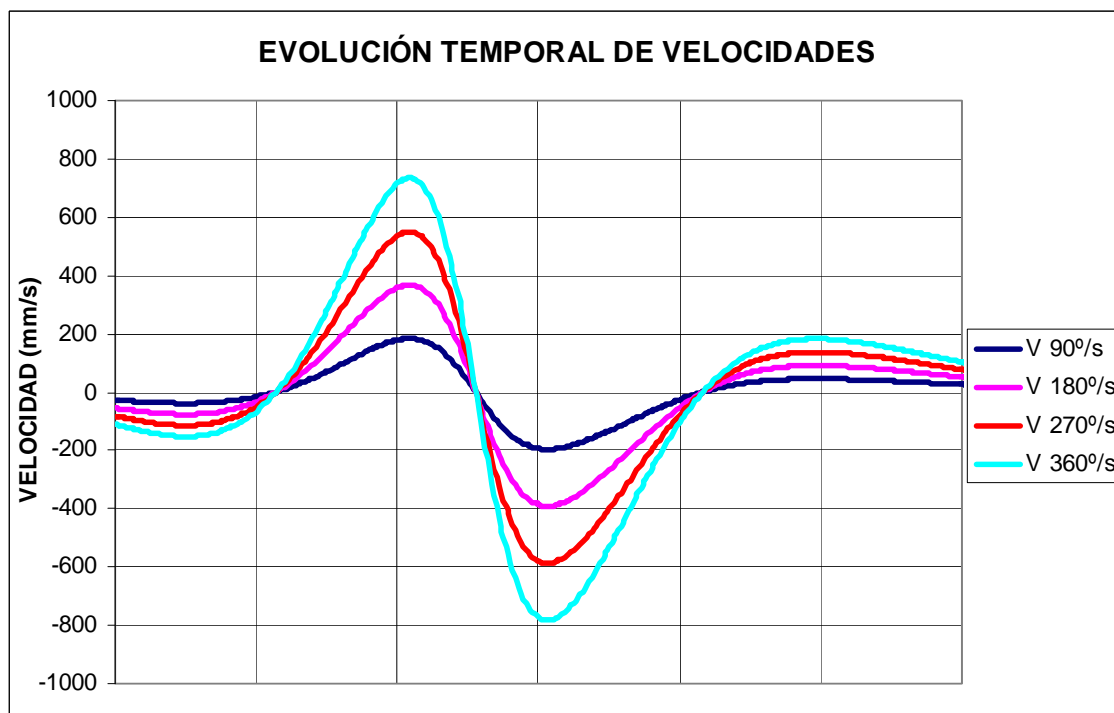
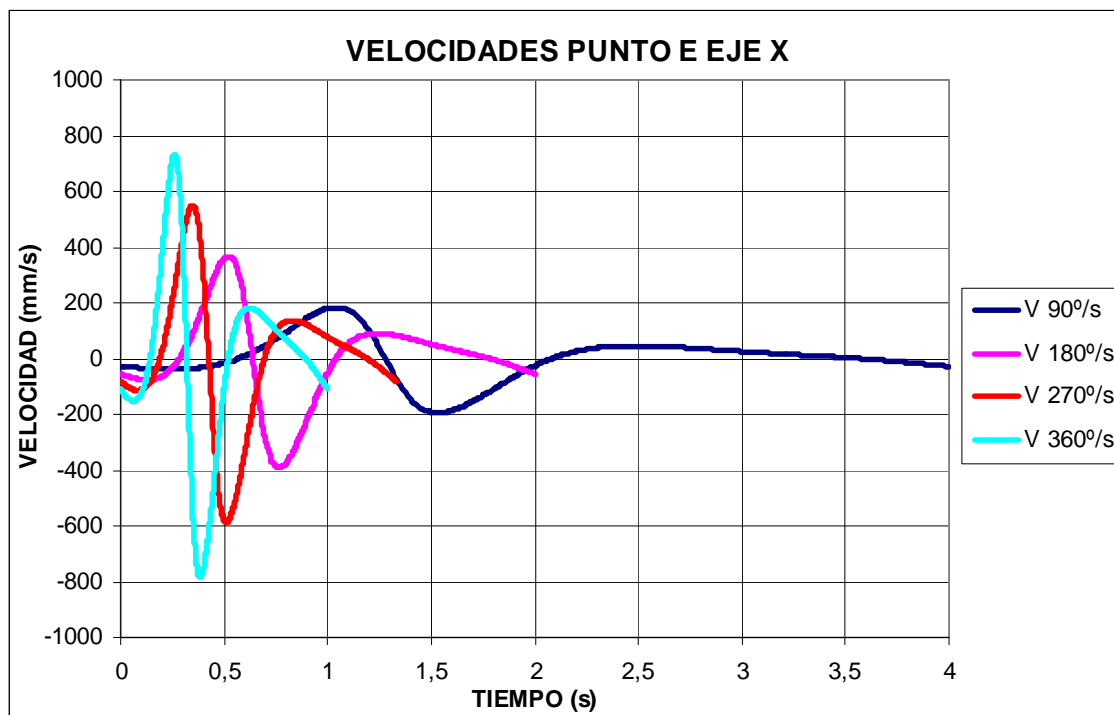
### Punto C eje X



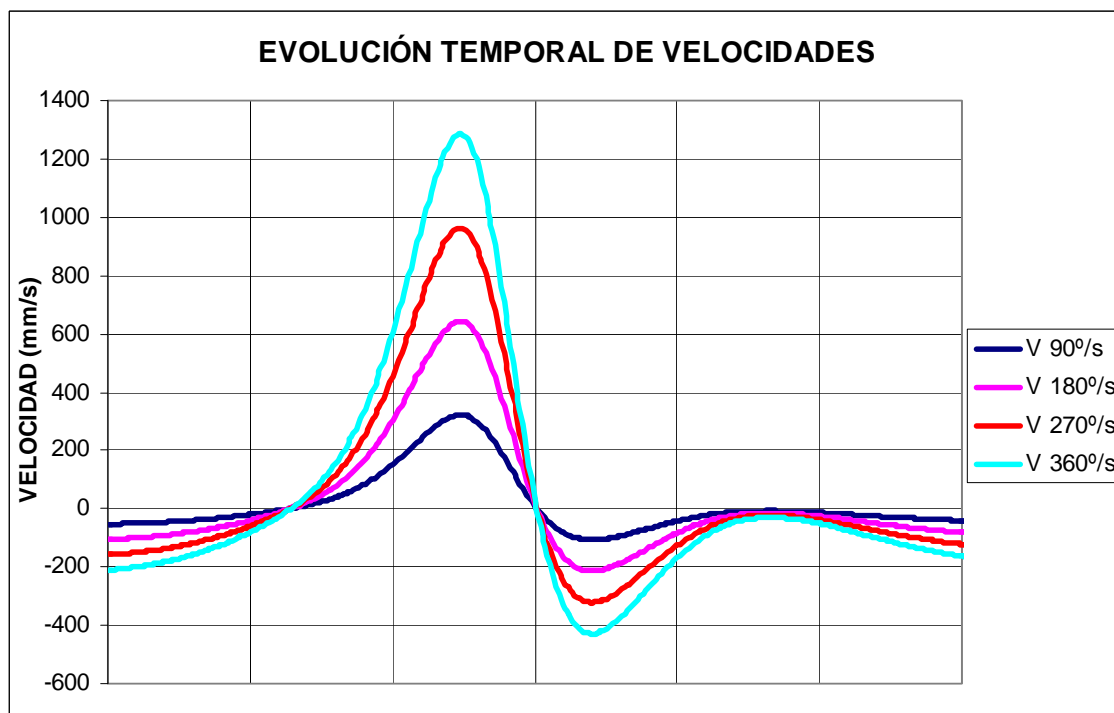
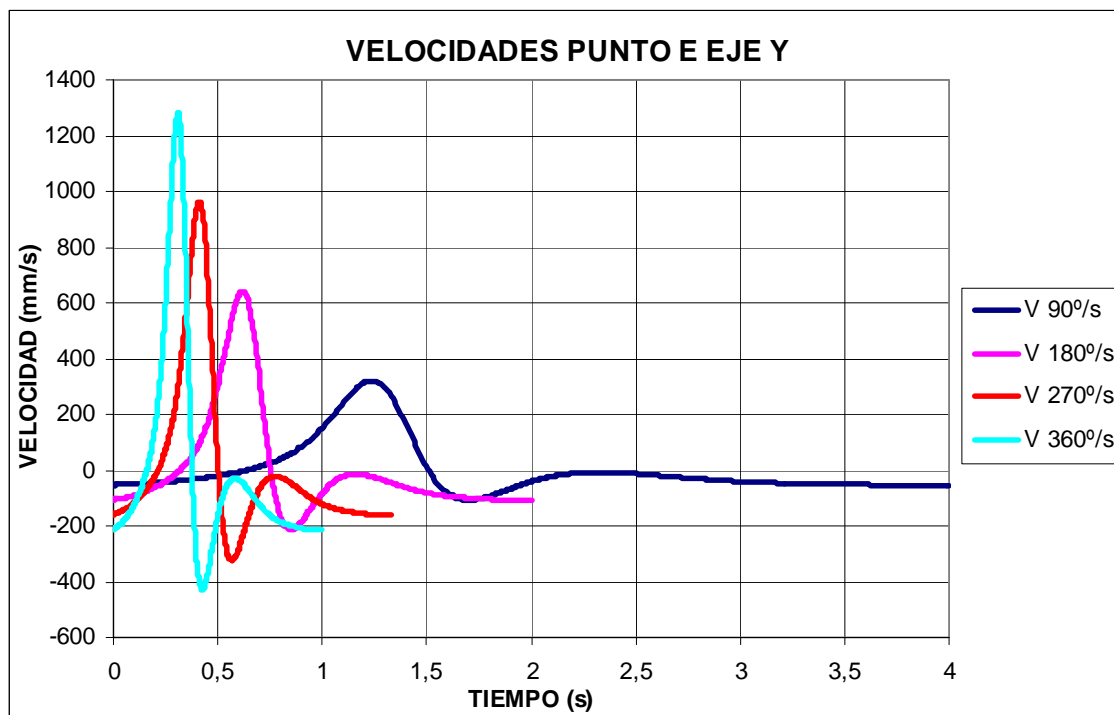
### Punto C eje Y



**Punto E eje X (Modelo original)**

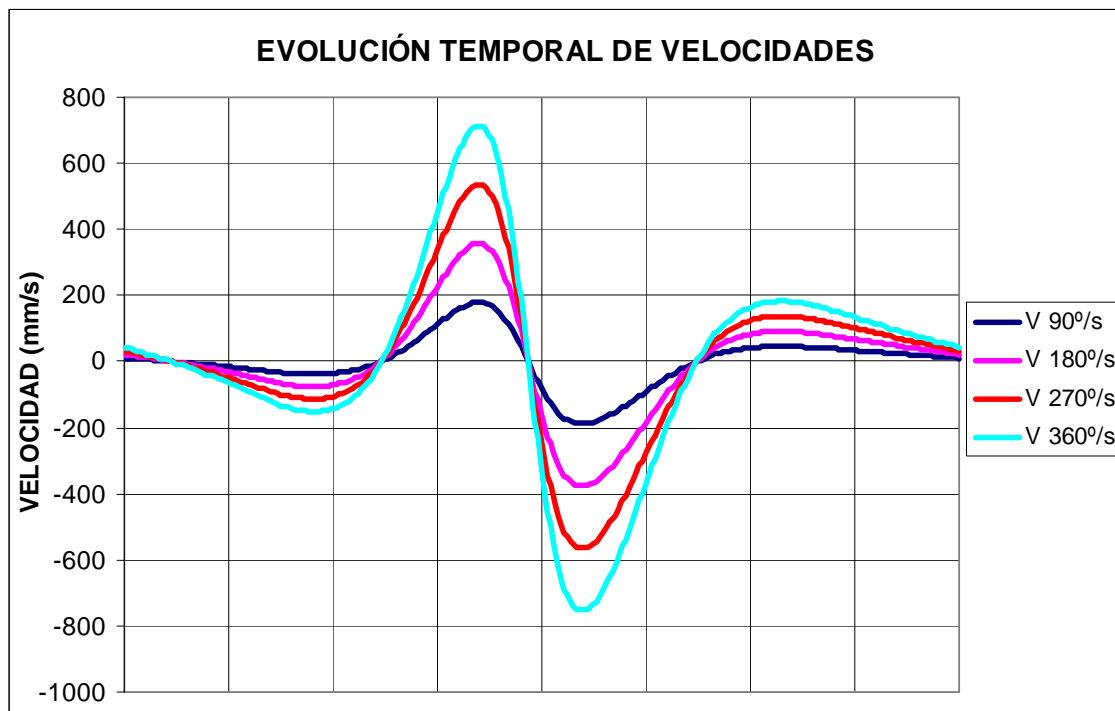
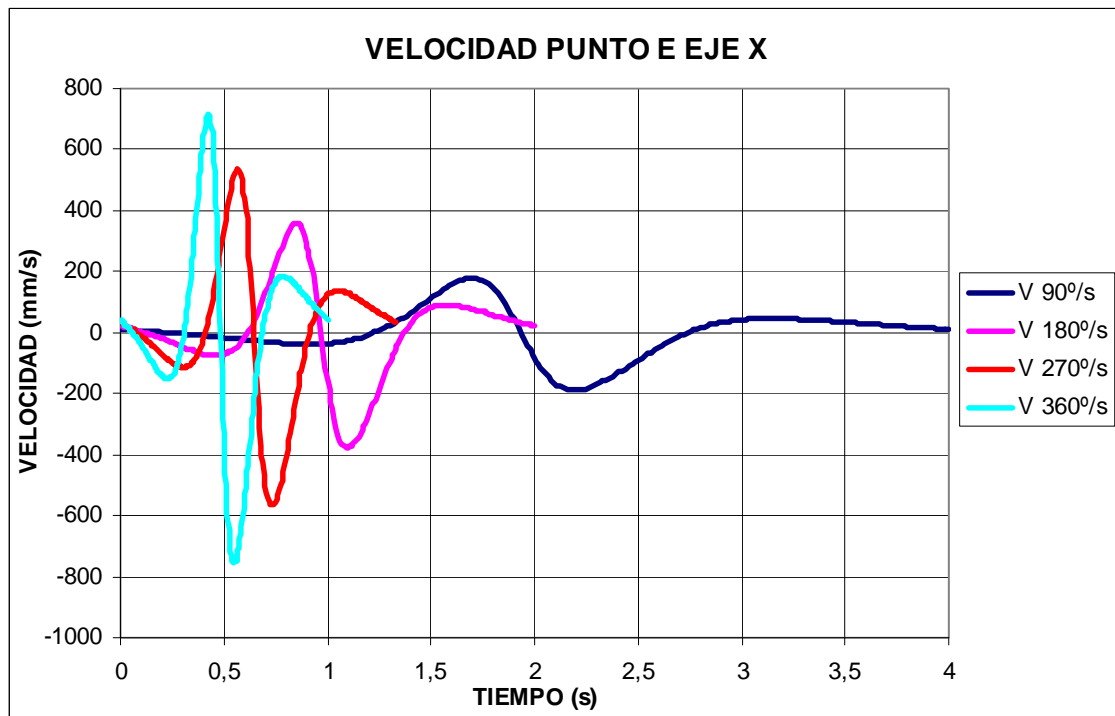


### Punto E eje Y (Modelo original)

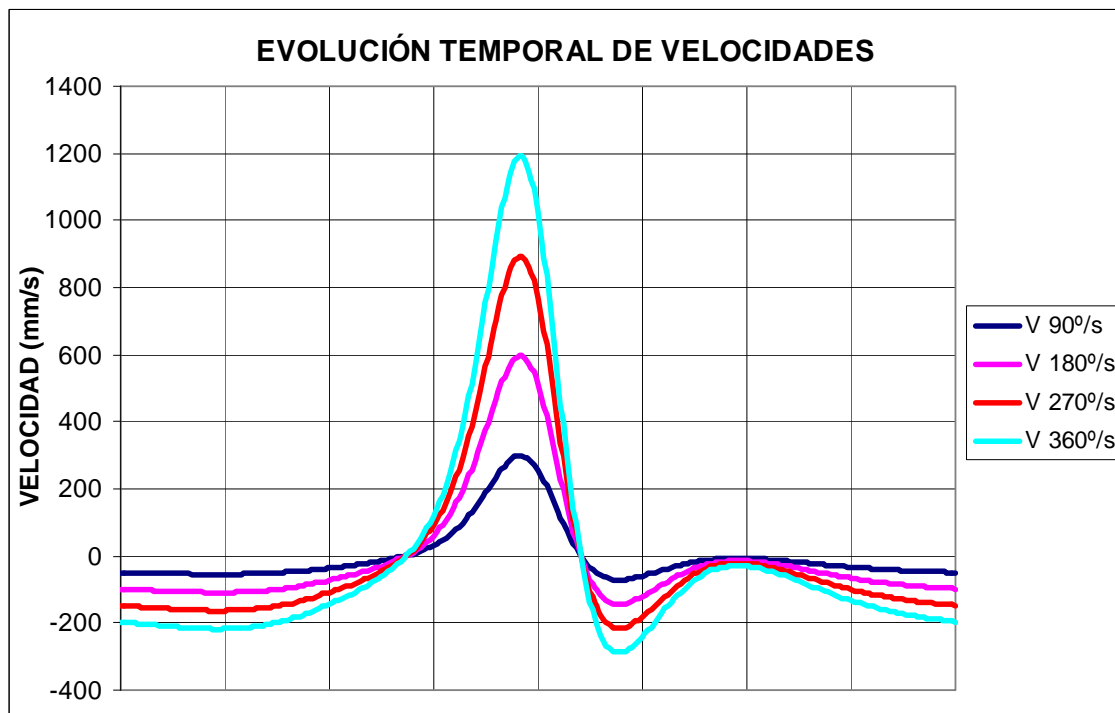
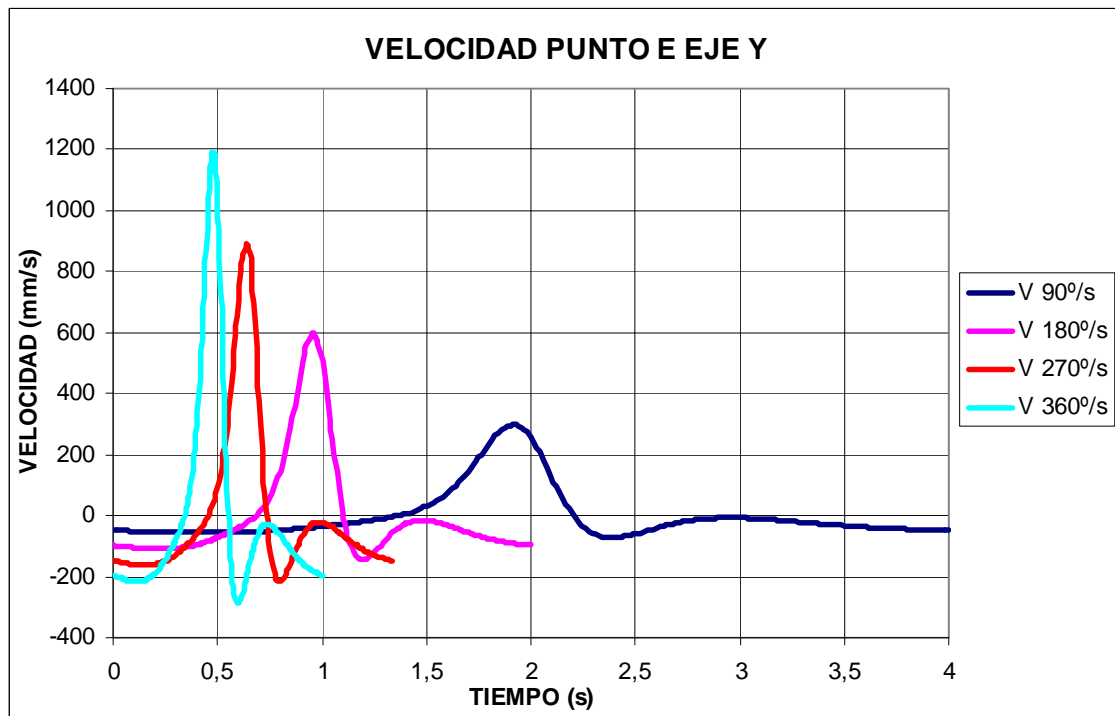




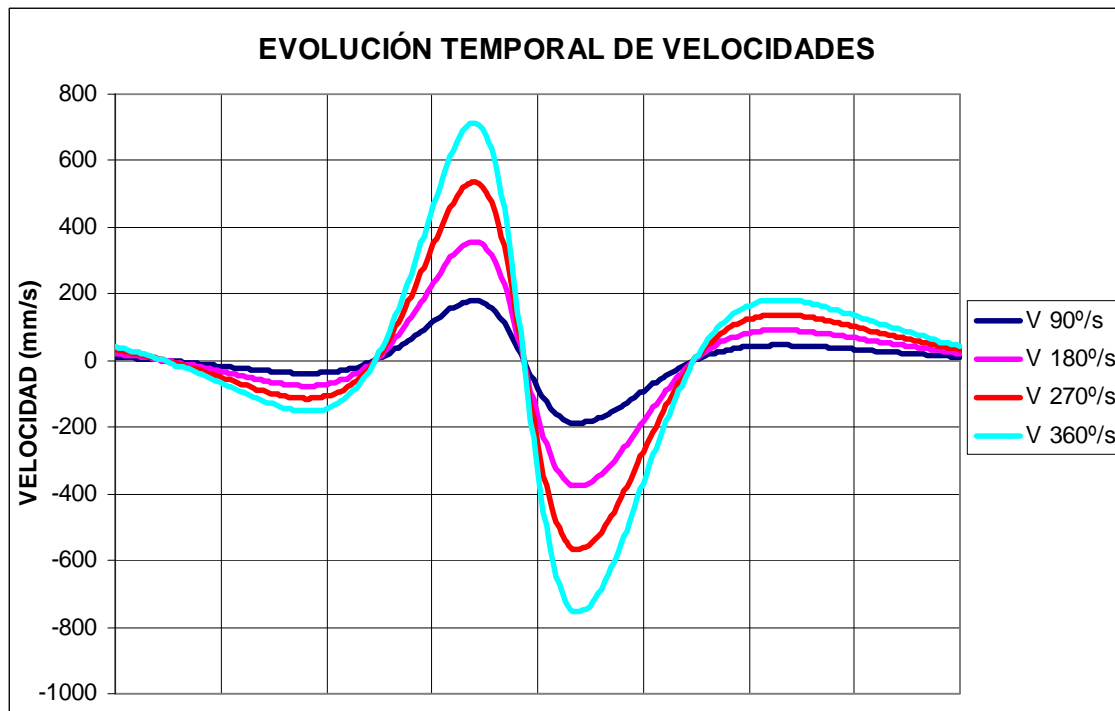
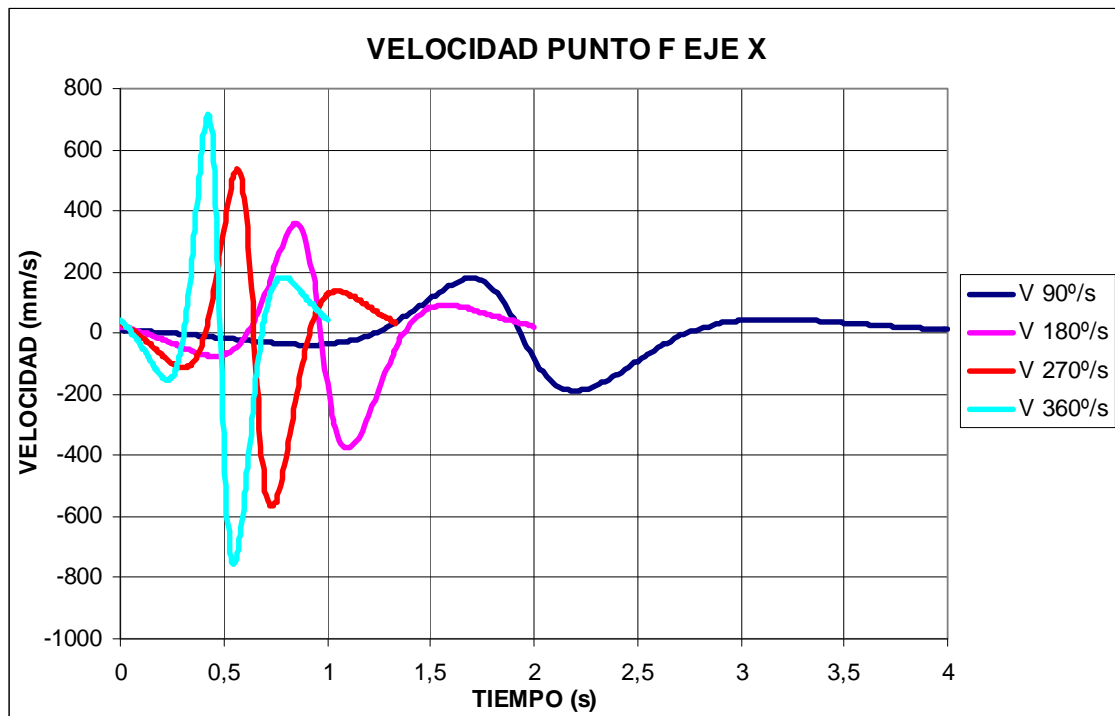
**Punto E eje X (Modelo modificado)**



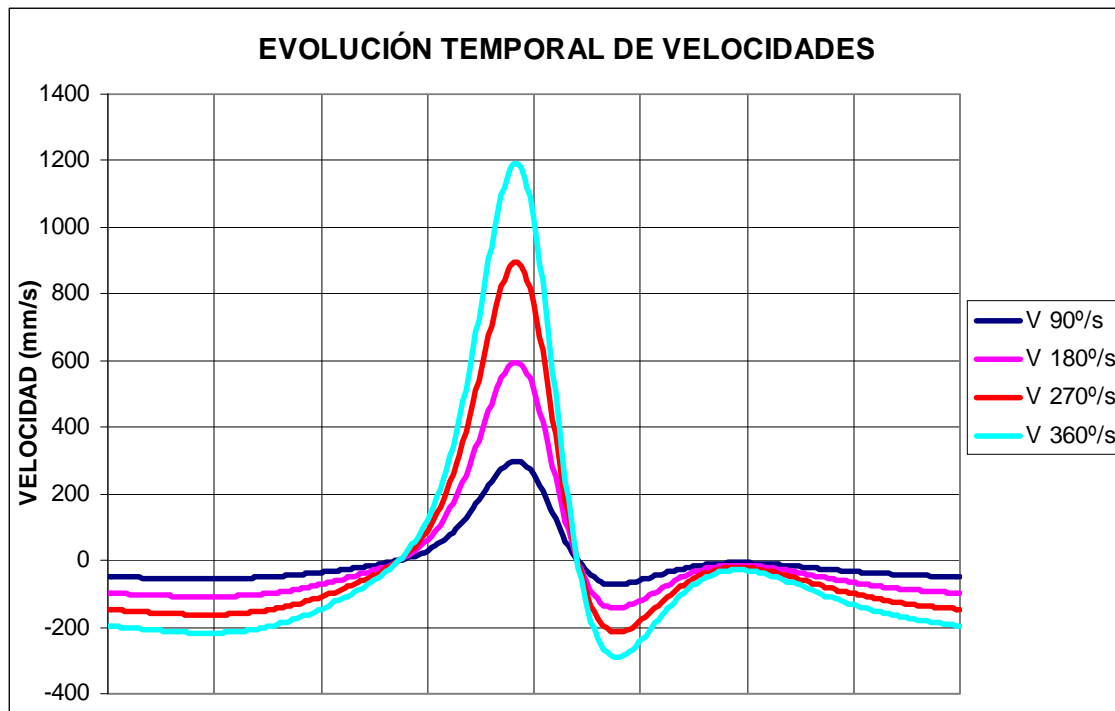
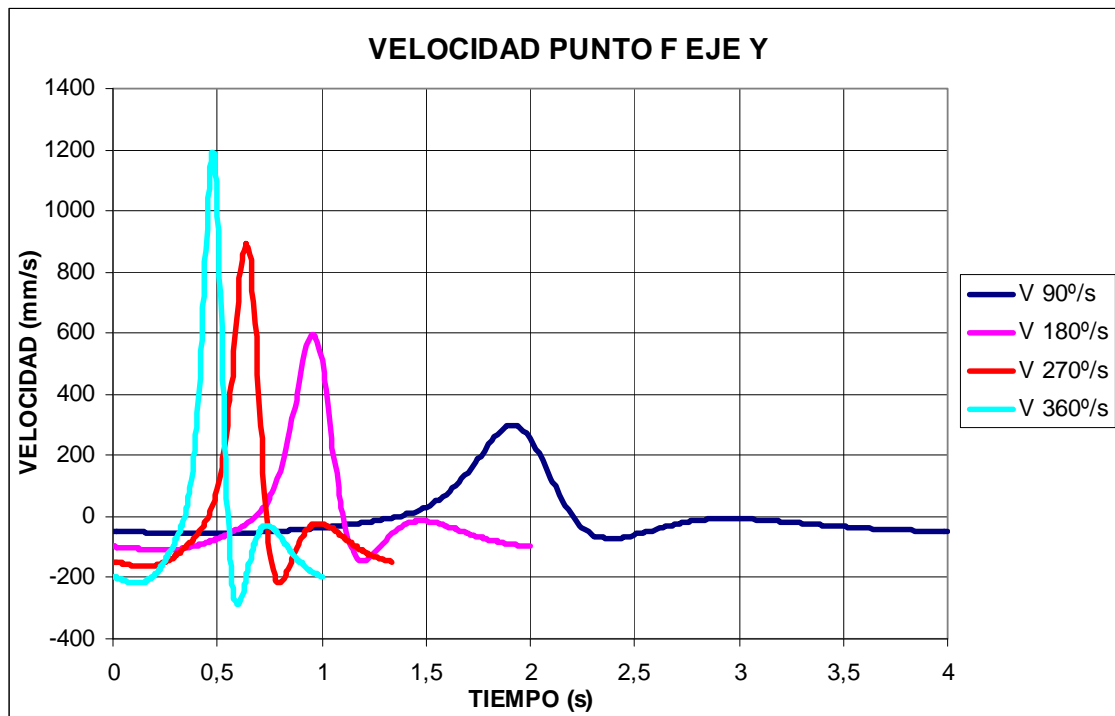
**Punto E eje Y (Modelo modificado)**



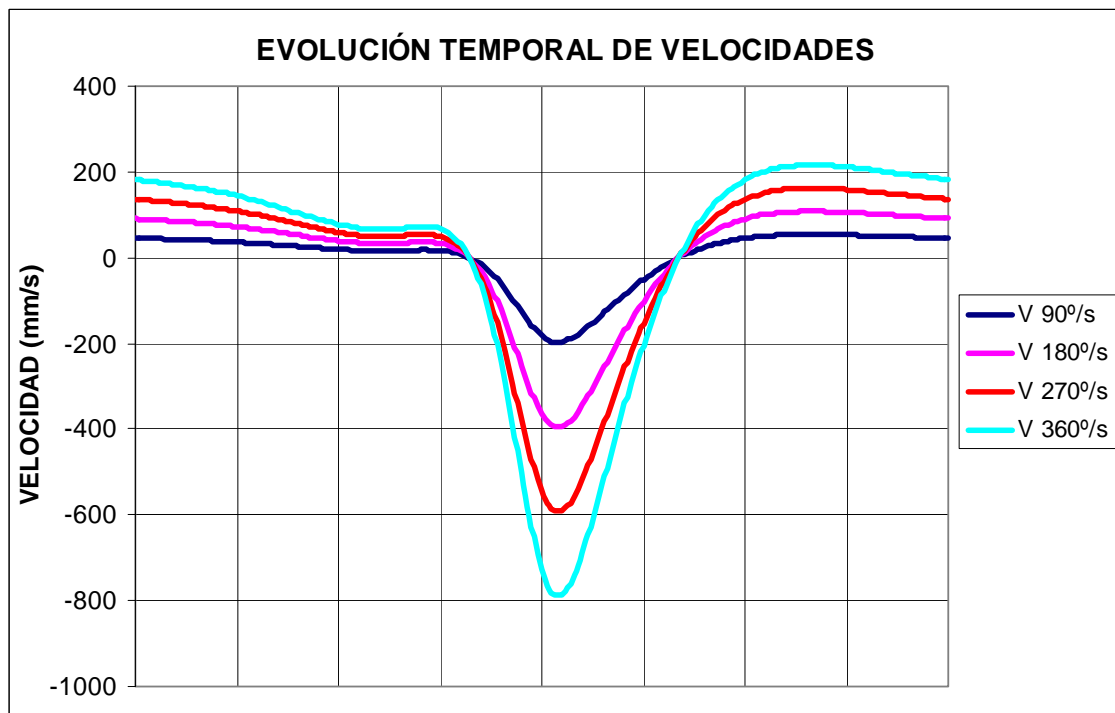
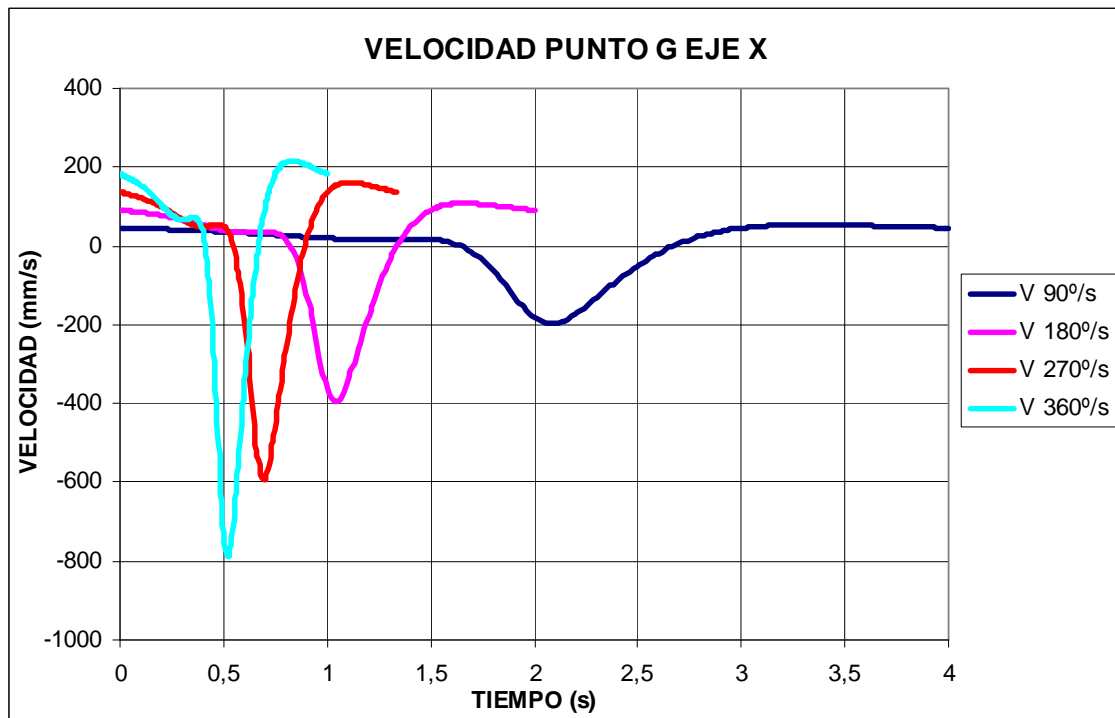
### Punto F eje X



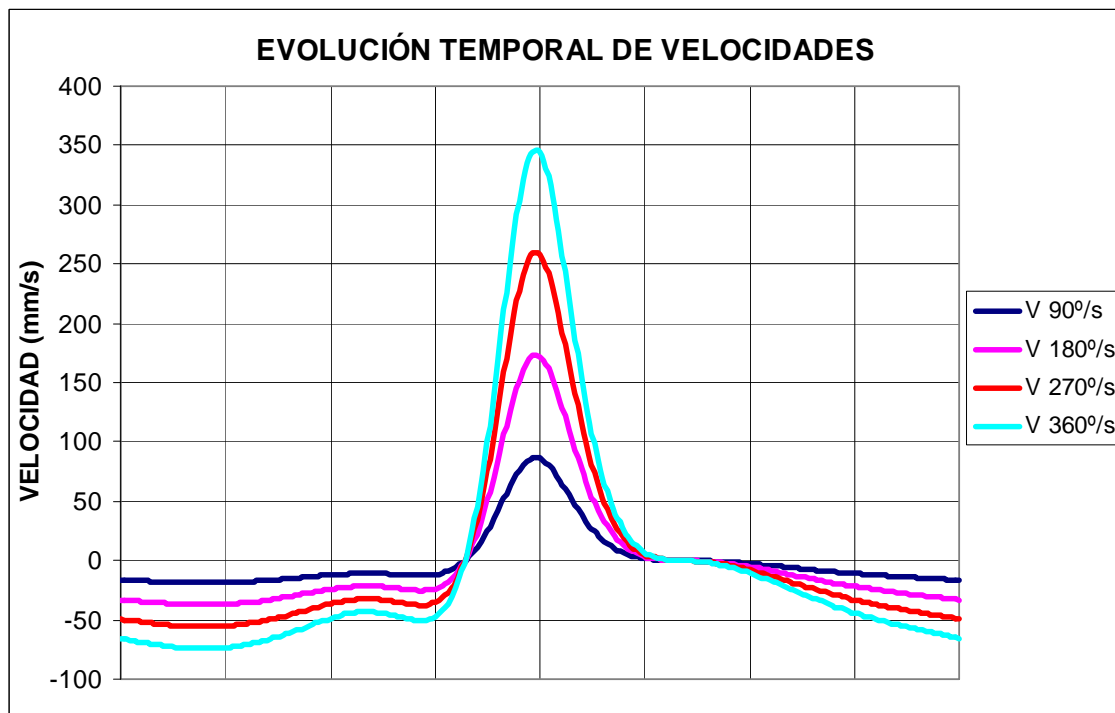
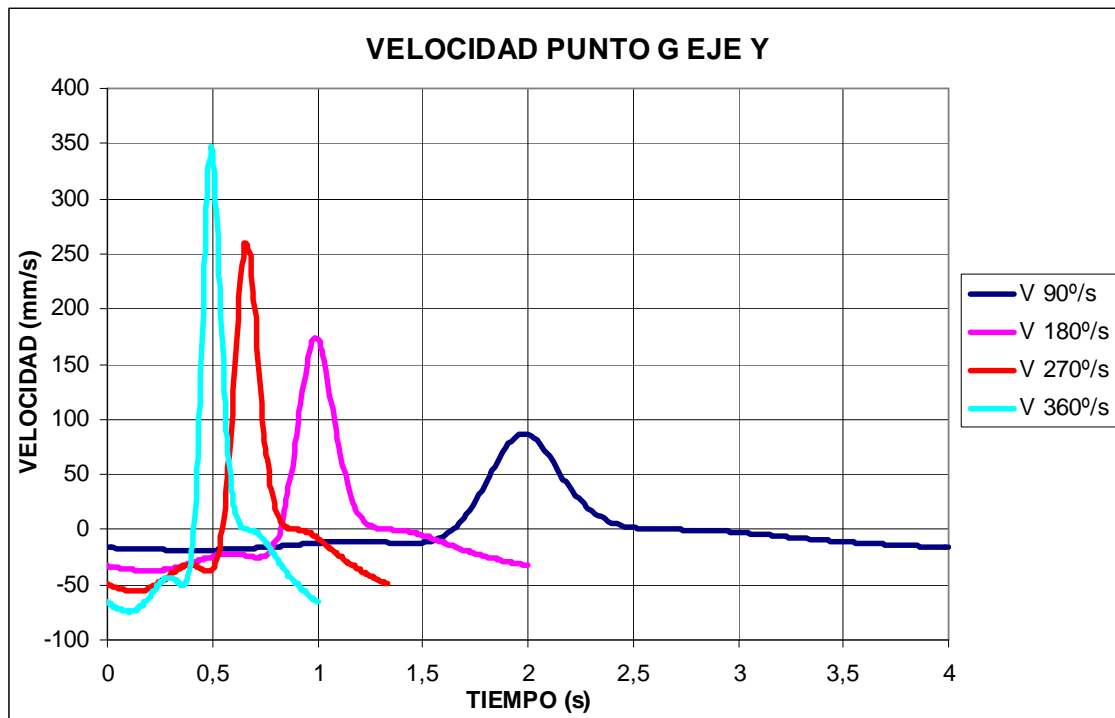
## Punto F eje Y



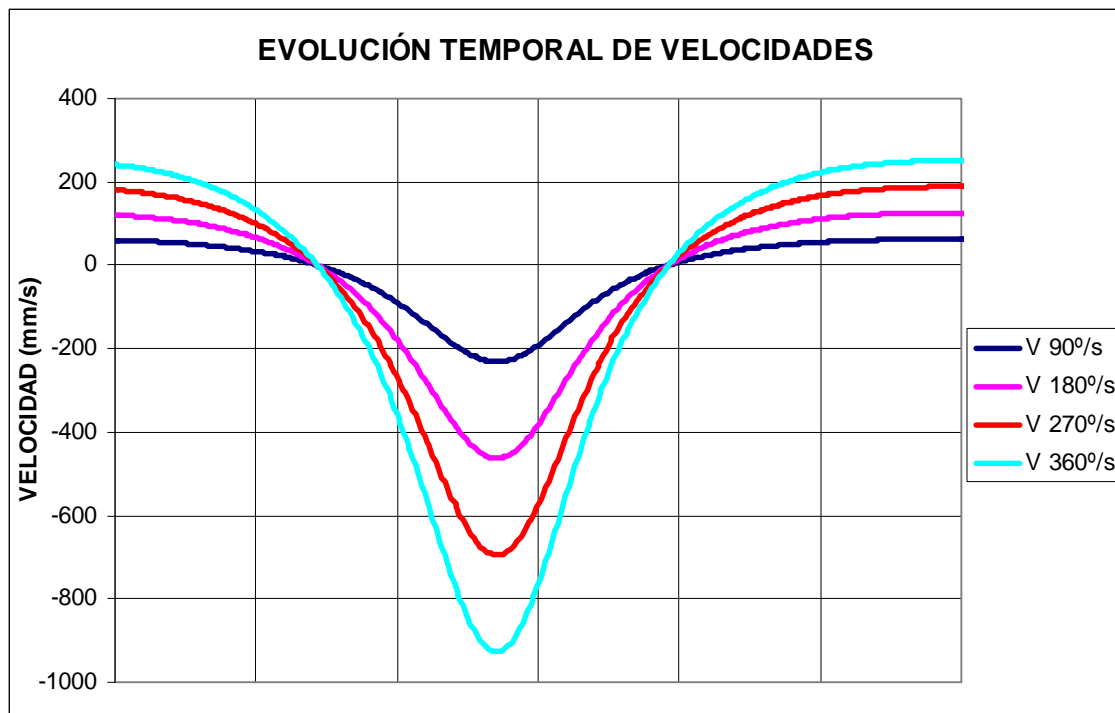
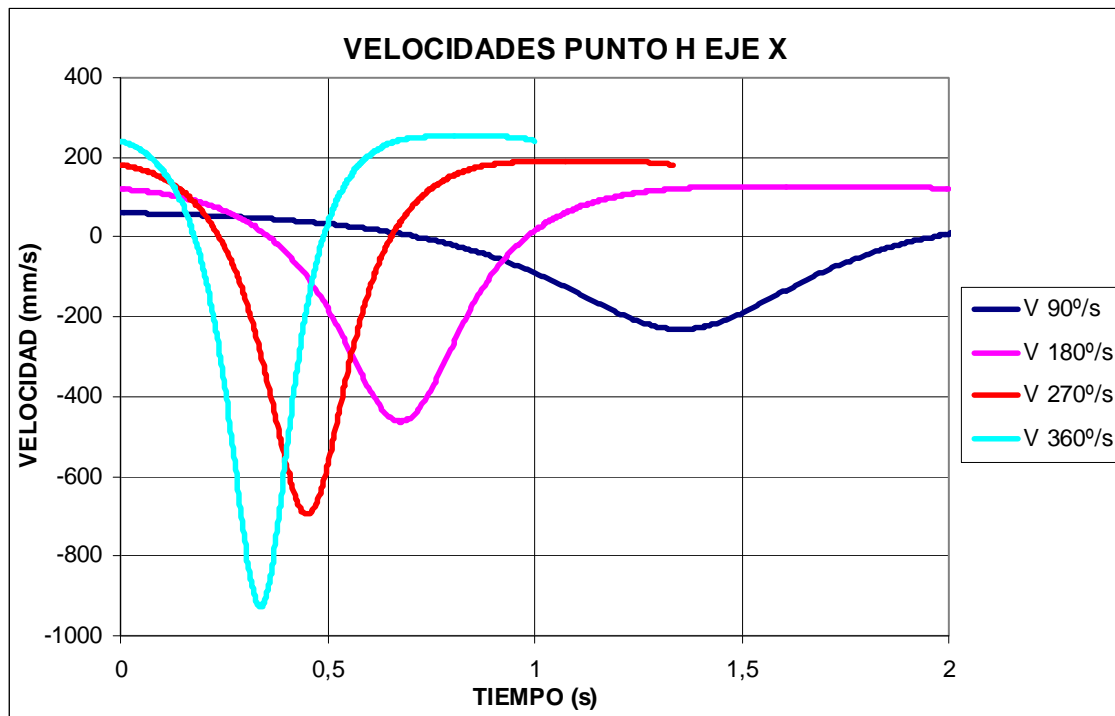
### Punto G eje X



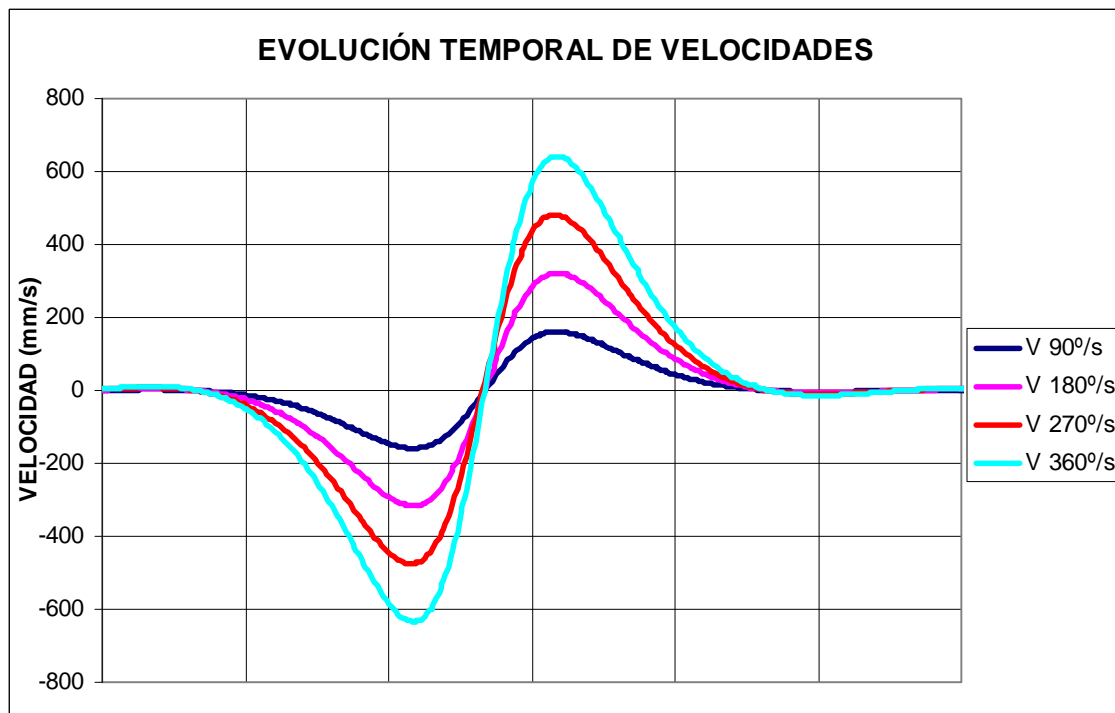
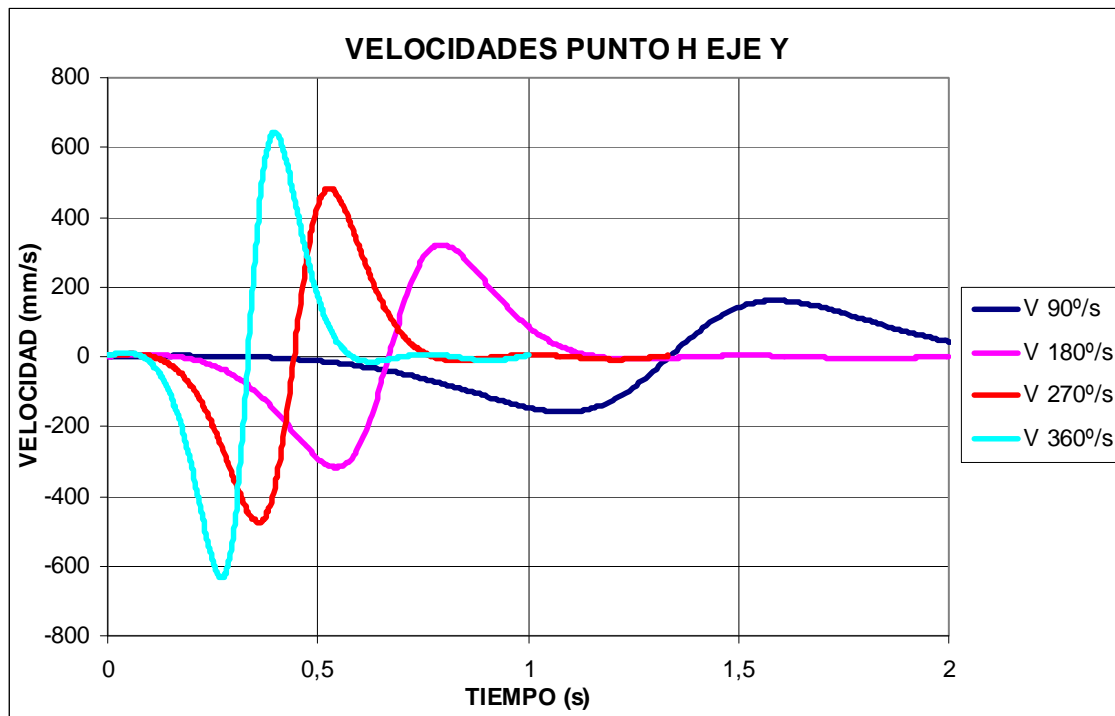
### Punto G eje Y



**Punto H eje X (Modelo original)**

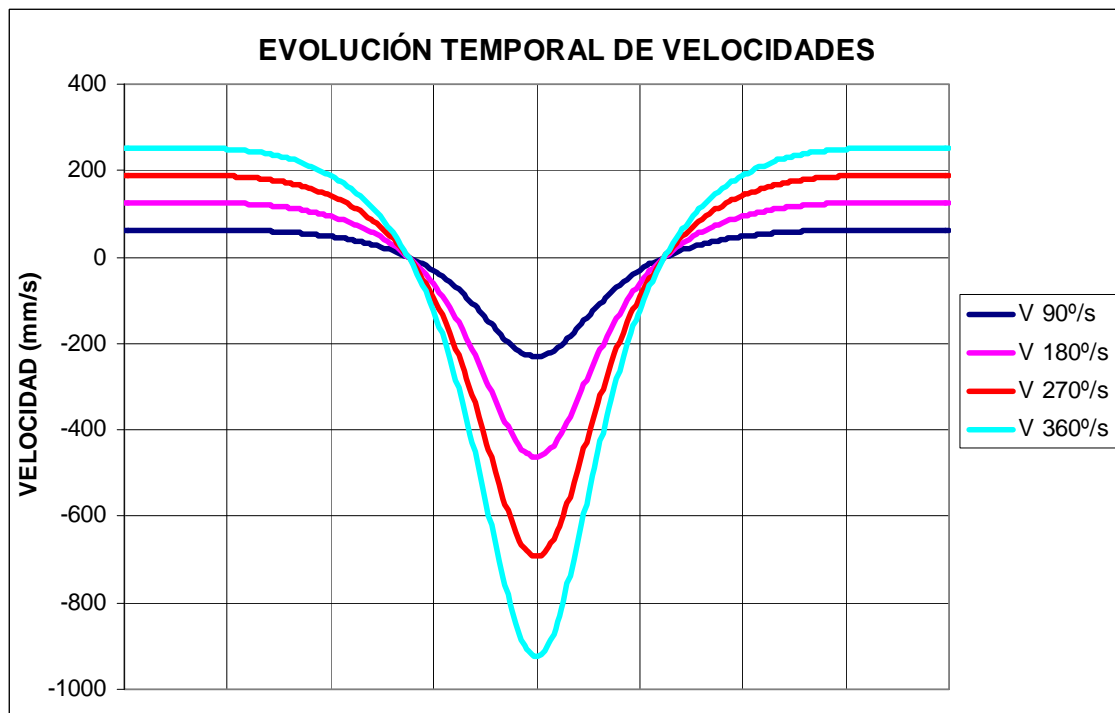
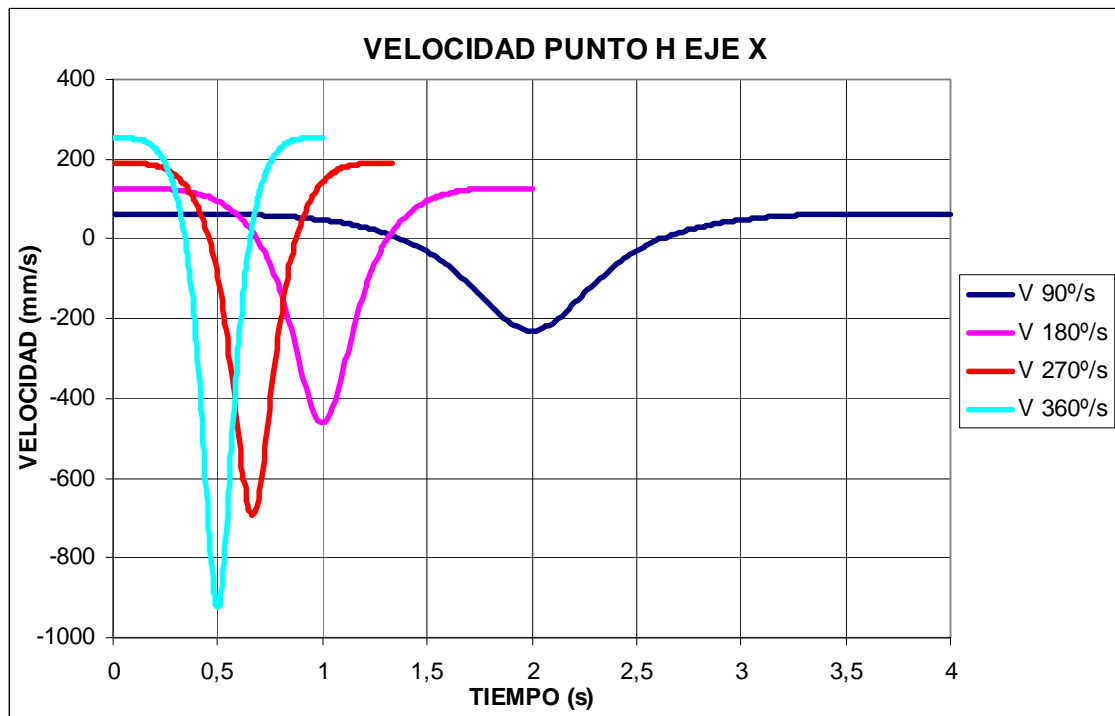


### Punto H eje Y (Modelo original)

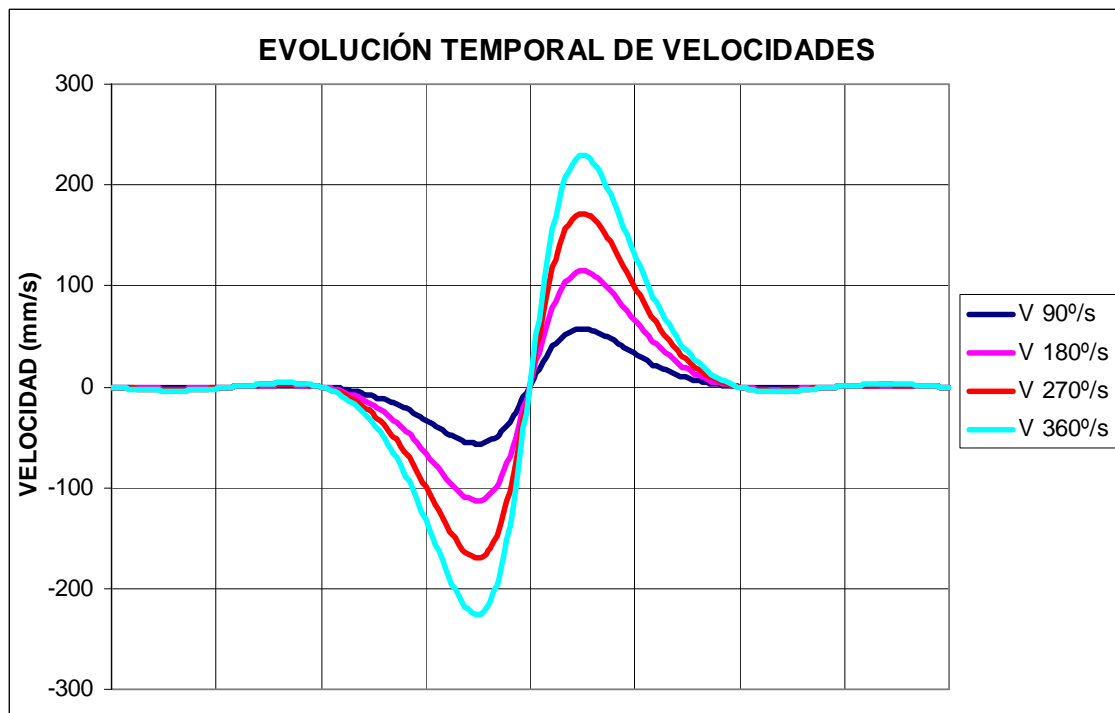
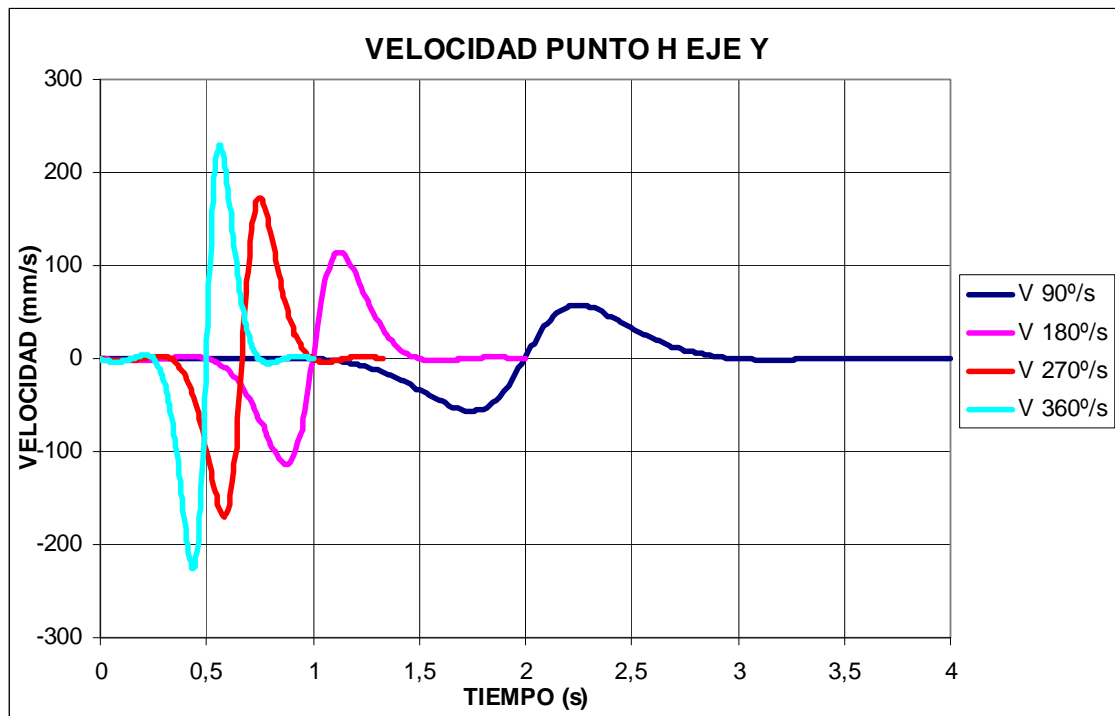




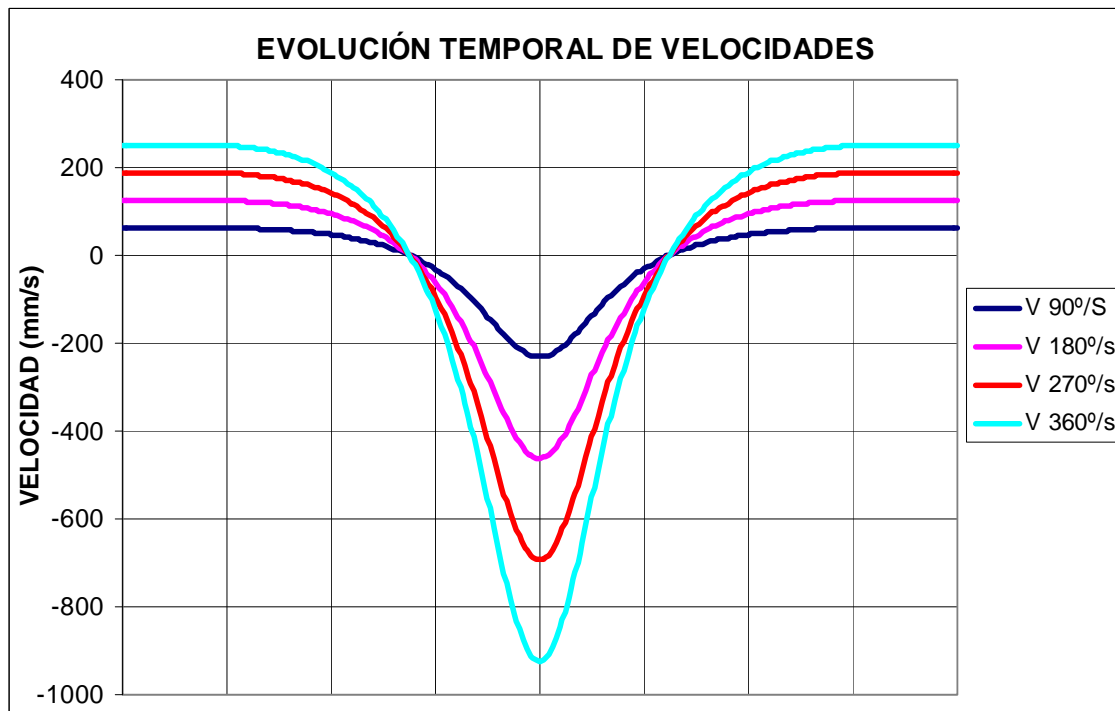
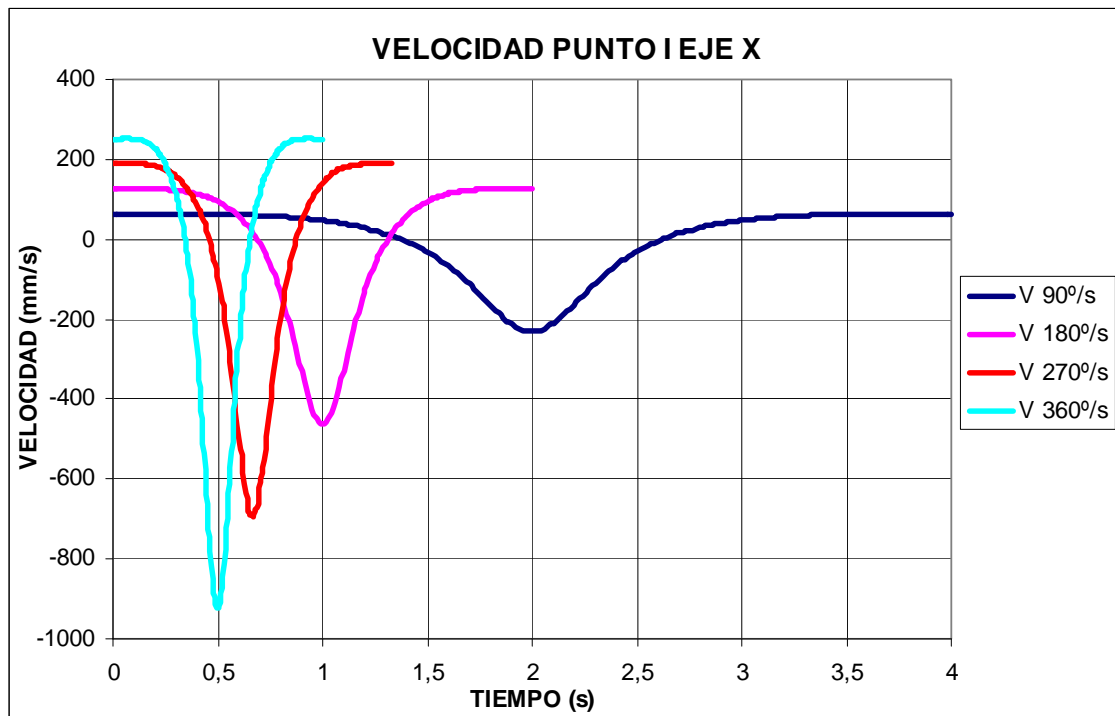
**Punto H eje X (Modelo modificado)**



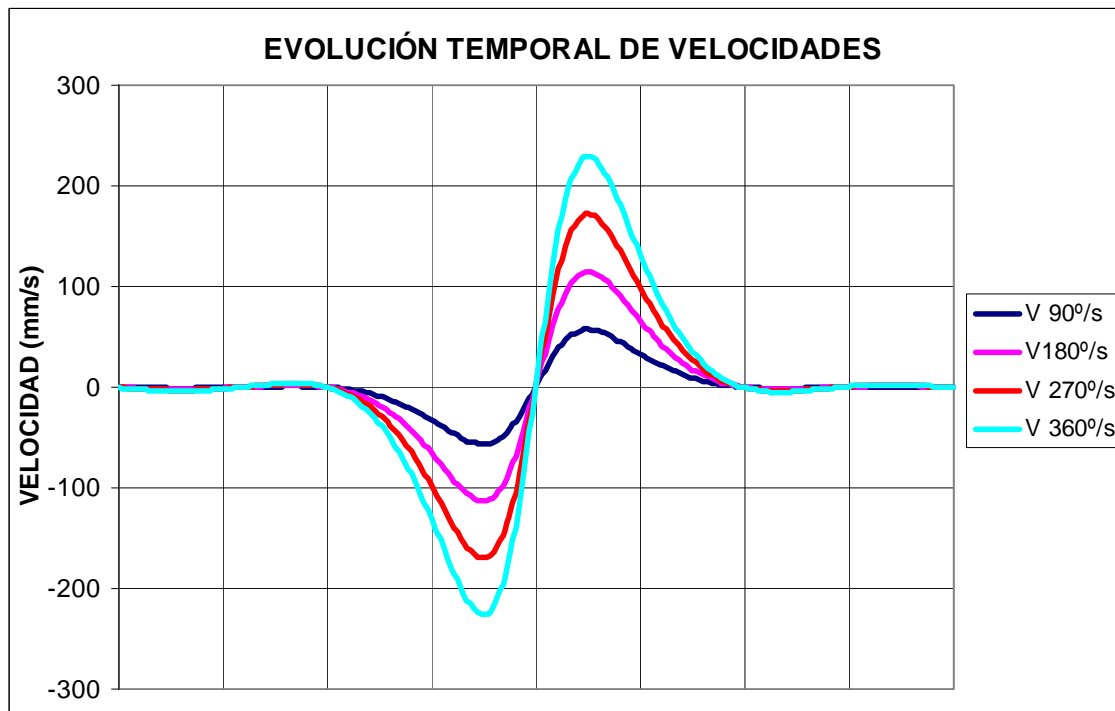
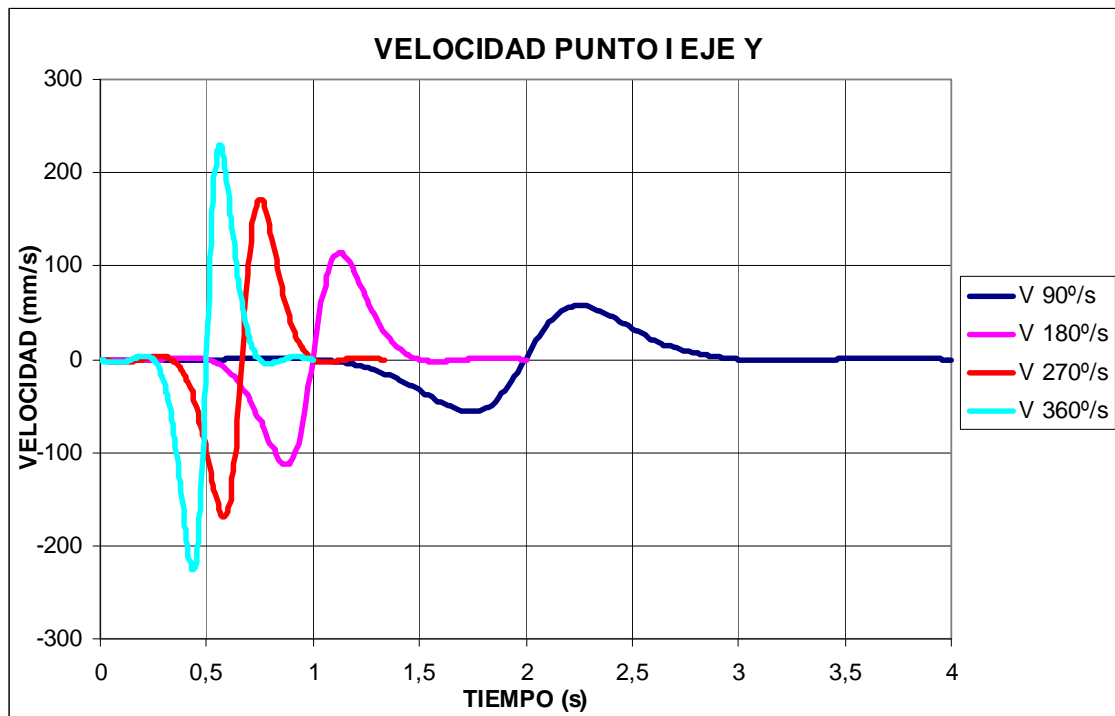
### Punto H eje Y (Modelo modificado)



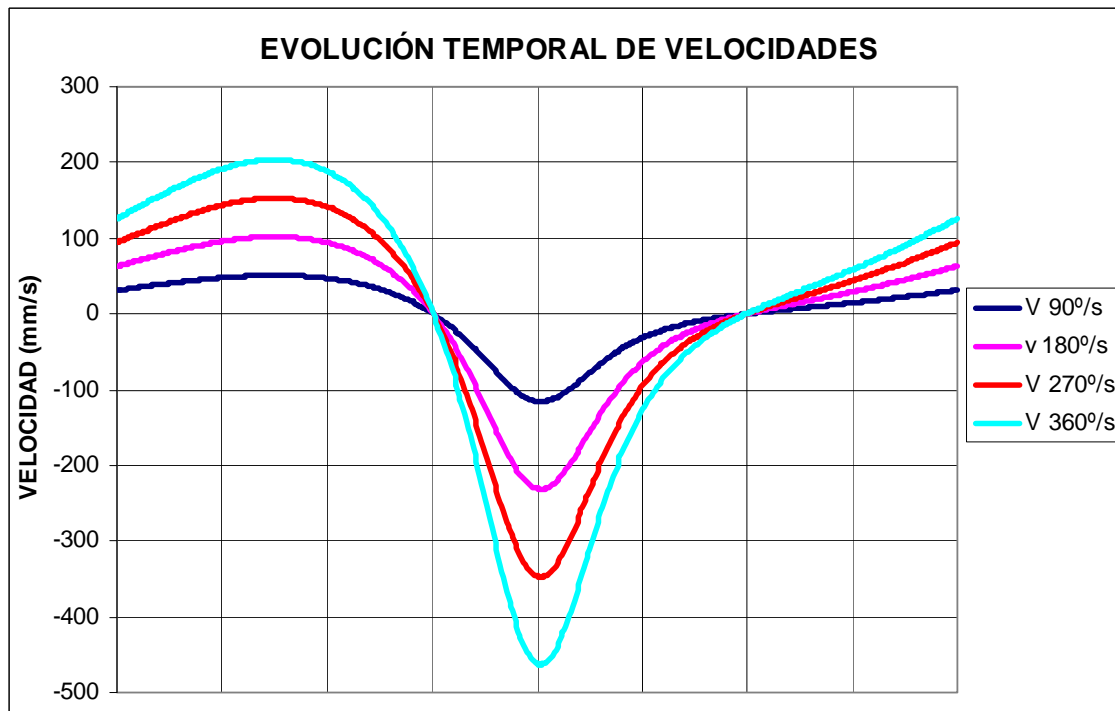
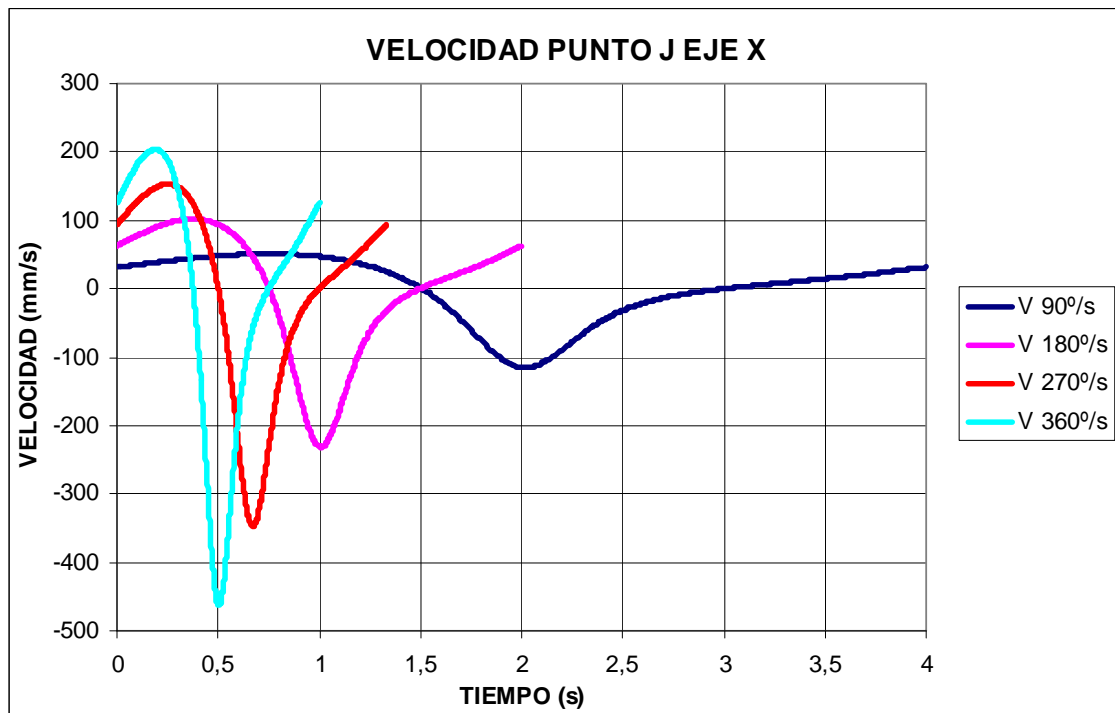
## Punto I eje X



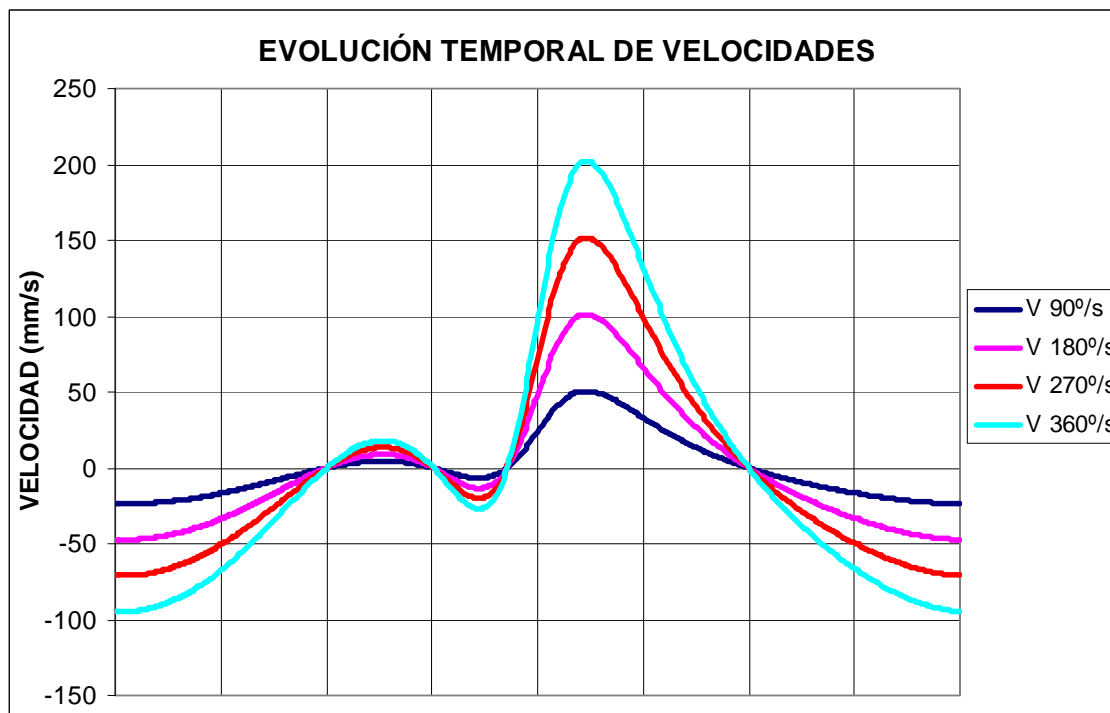
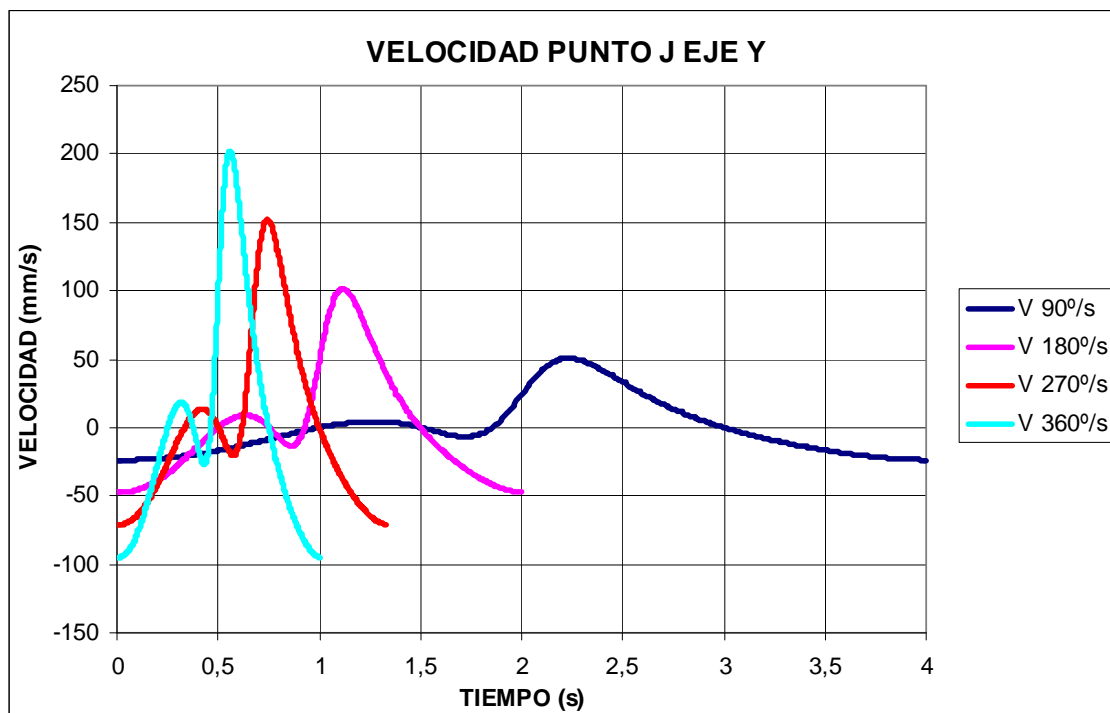
## Punto I eje Y



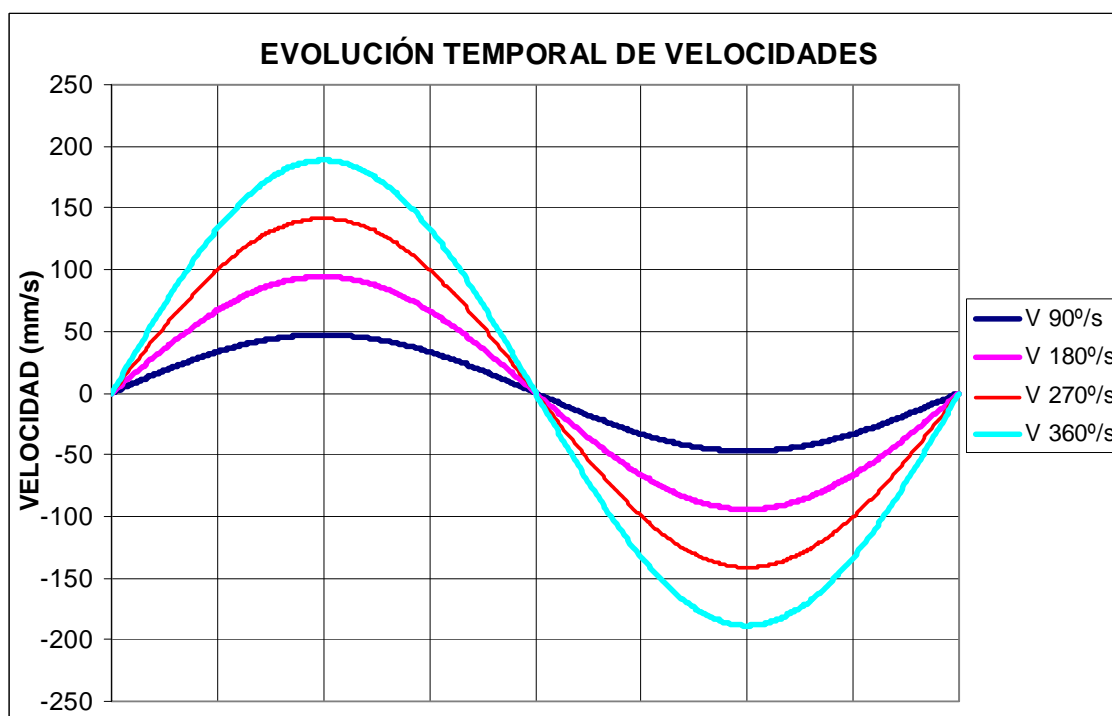
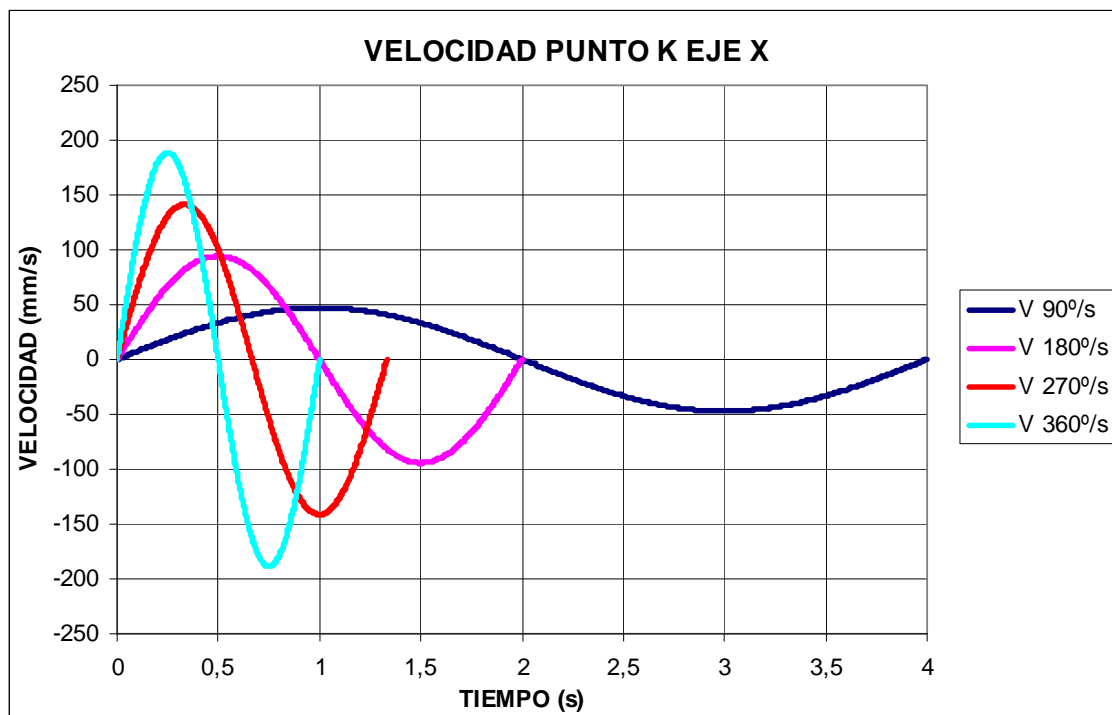
### Punto J eje X



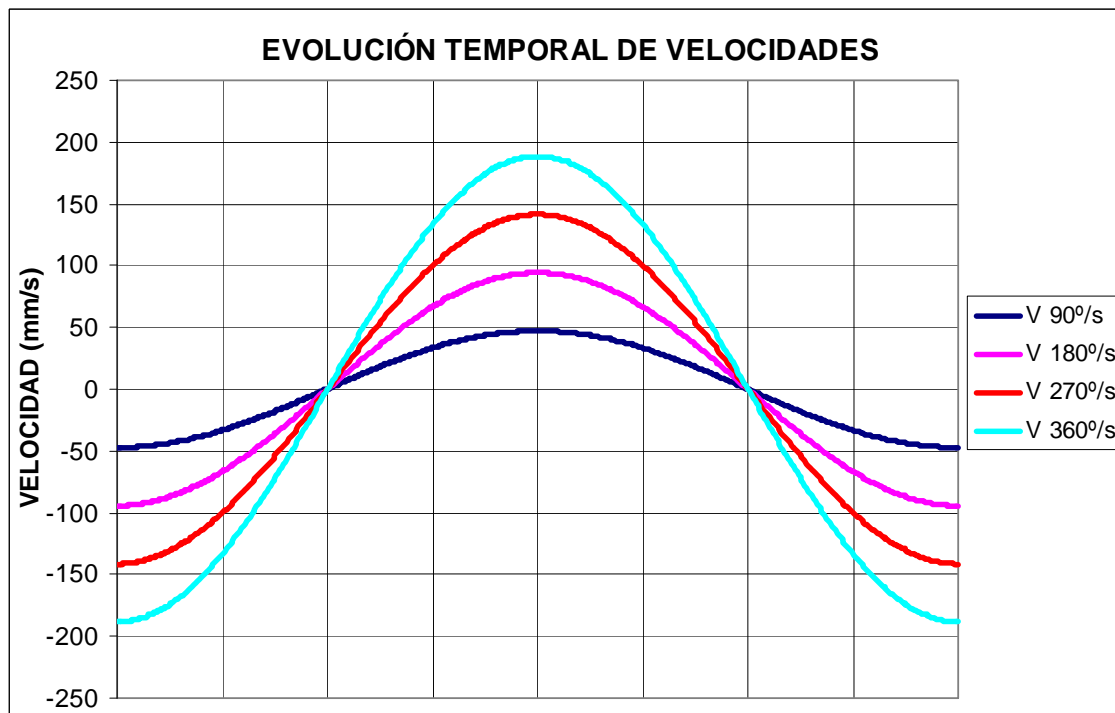
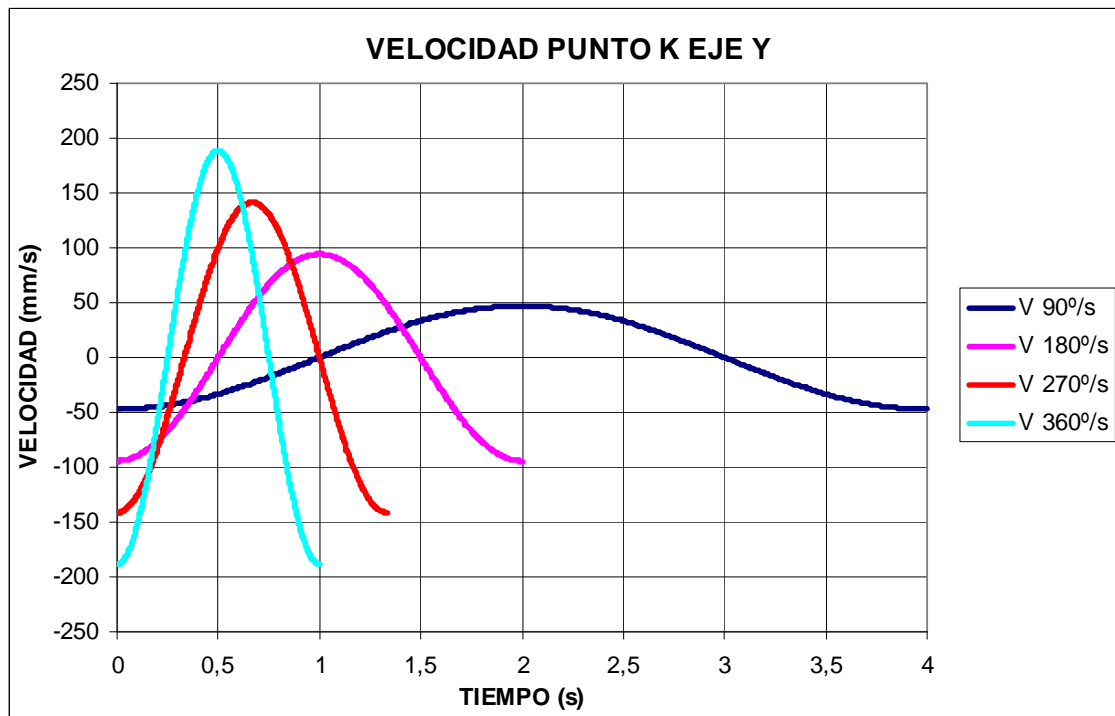
### Punto J eje Y



### Punto K eje X



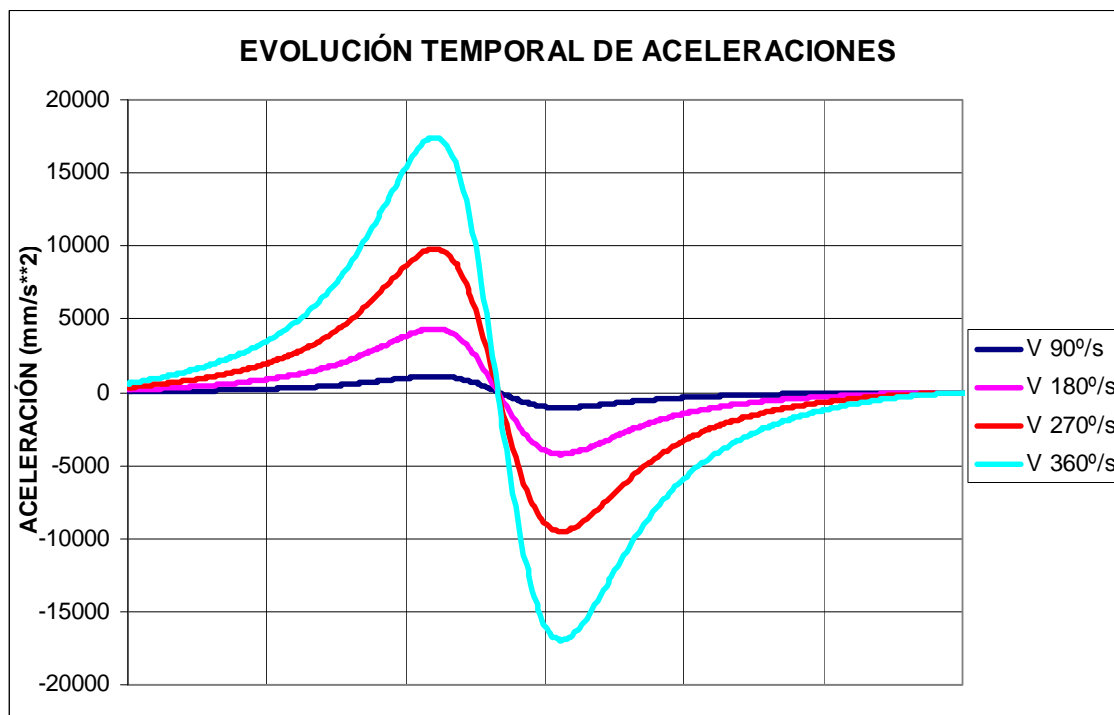
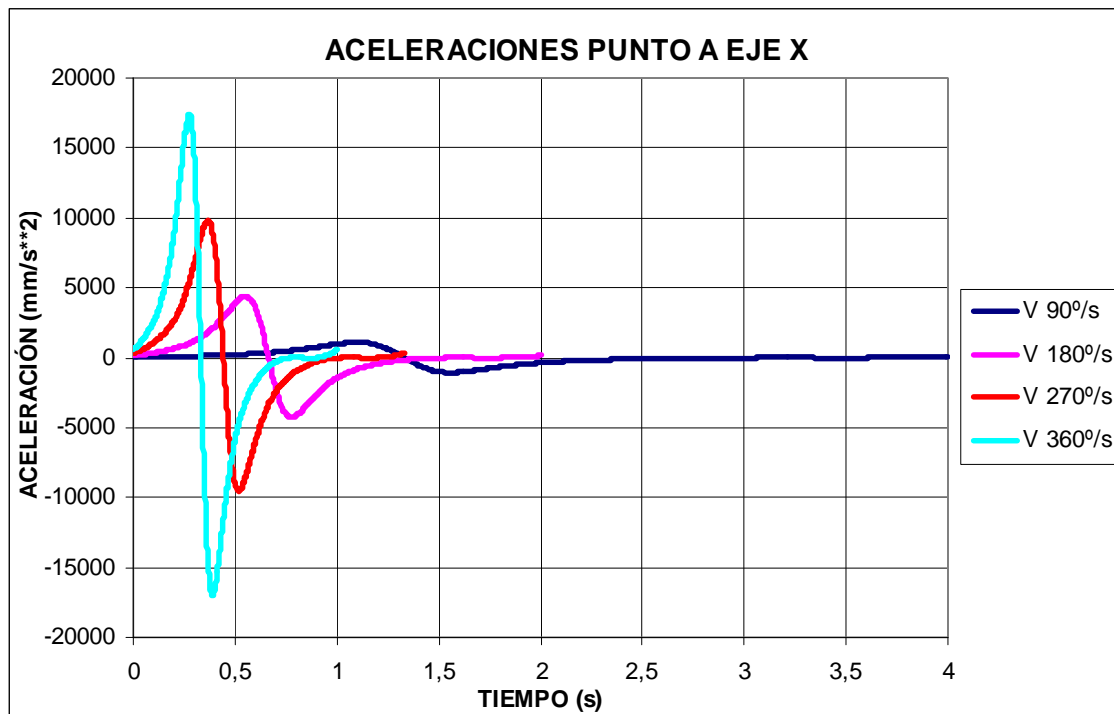
### Punto K eje Y



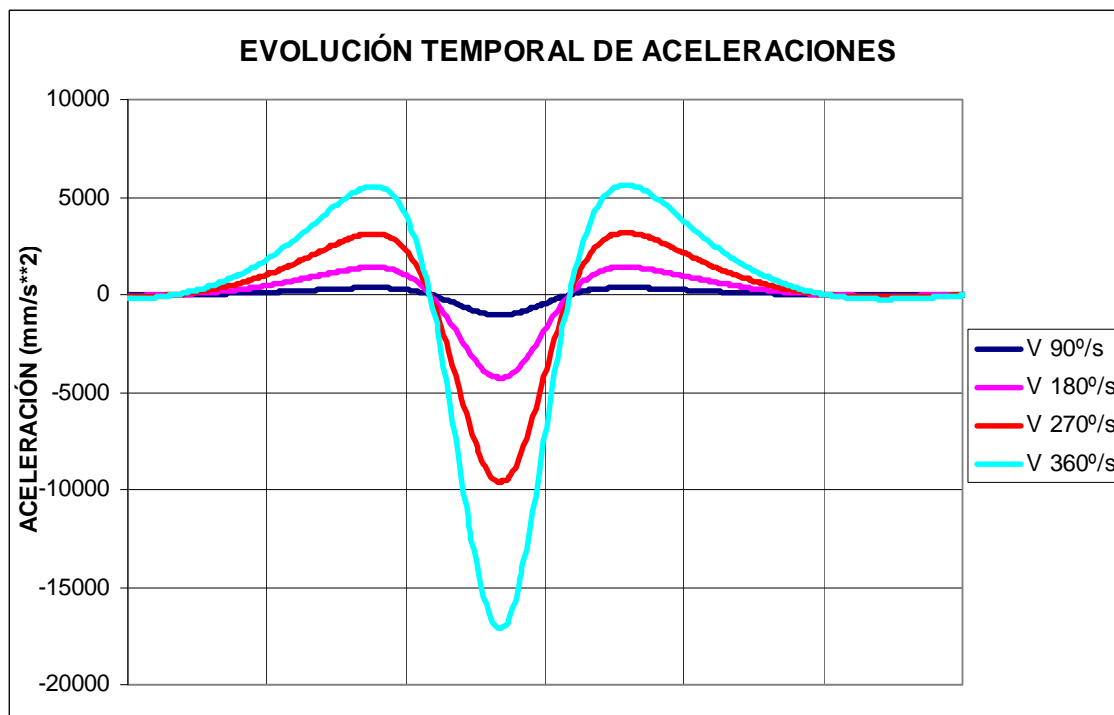
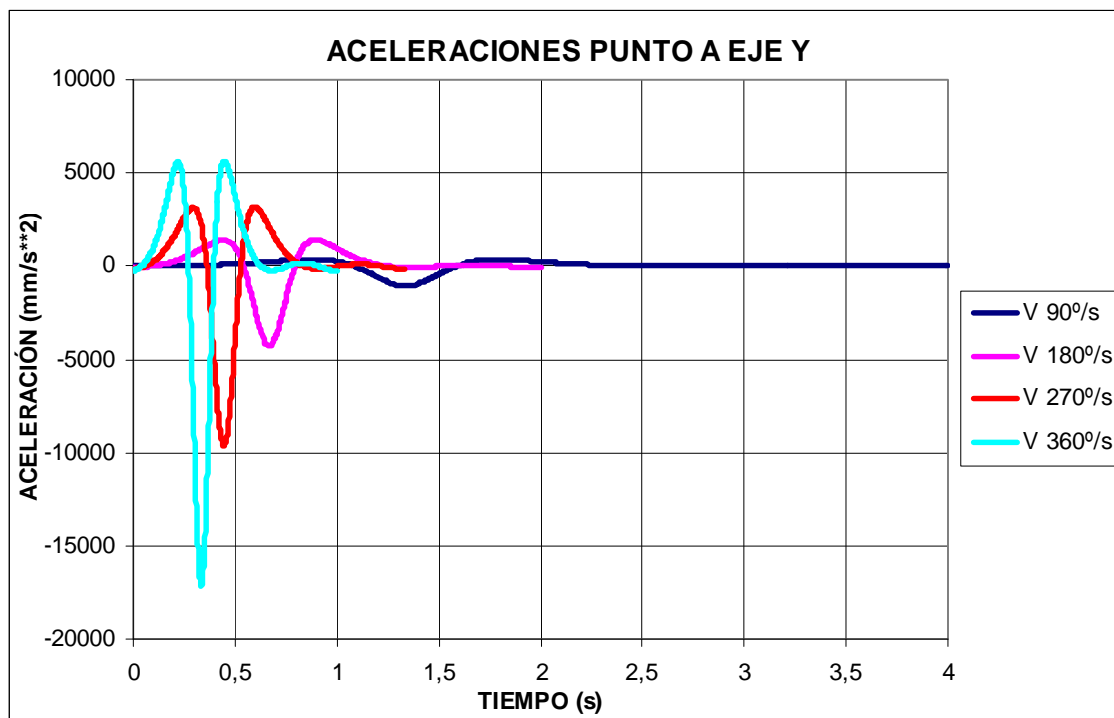


## Aceleraciones

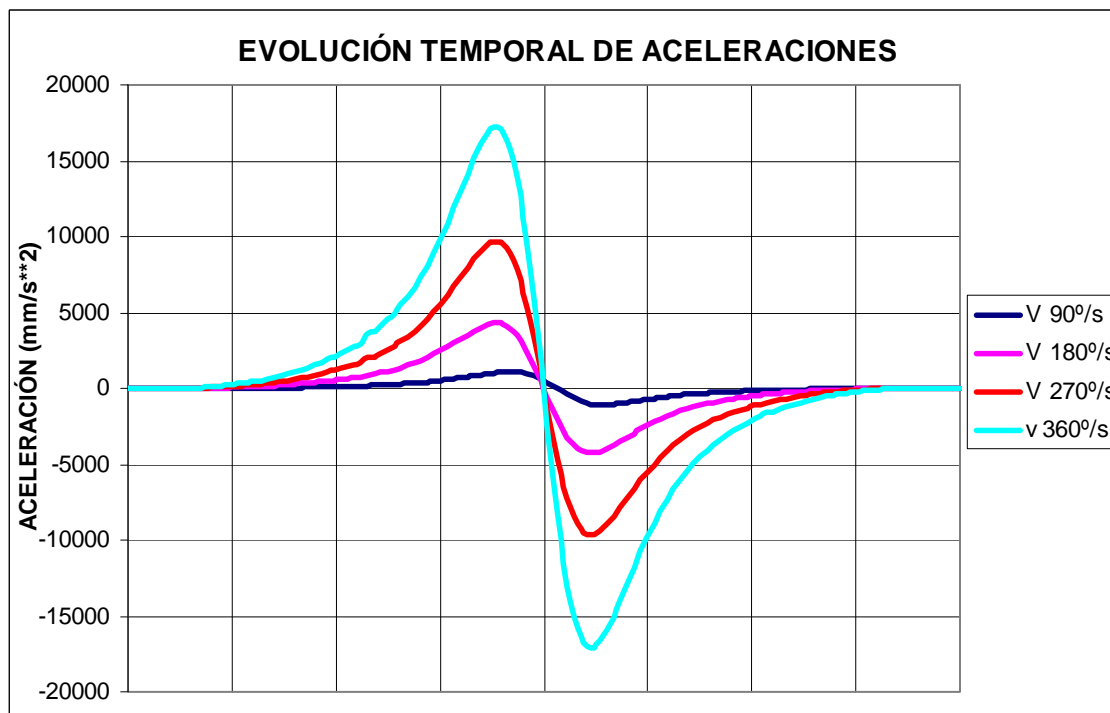
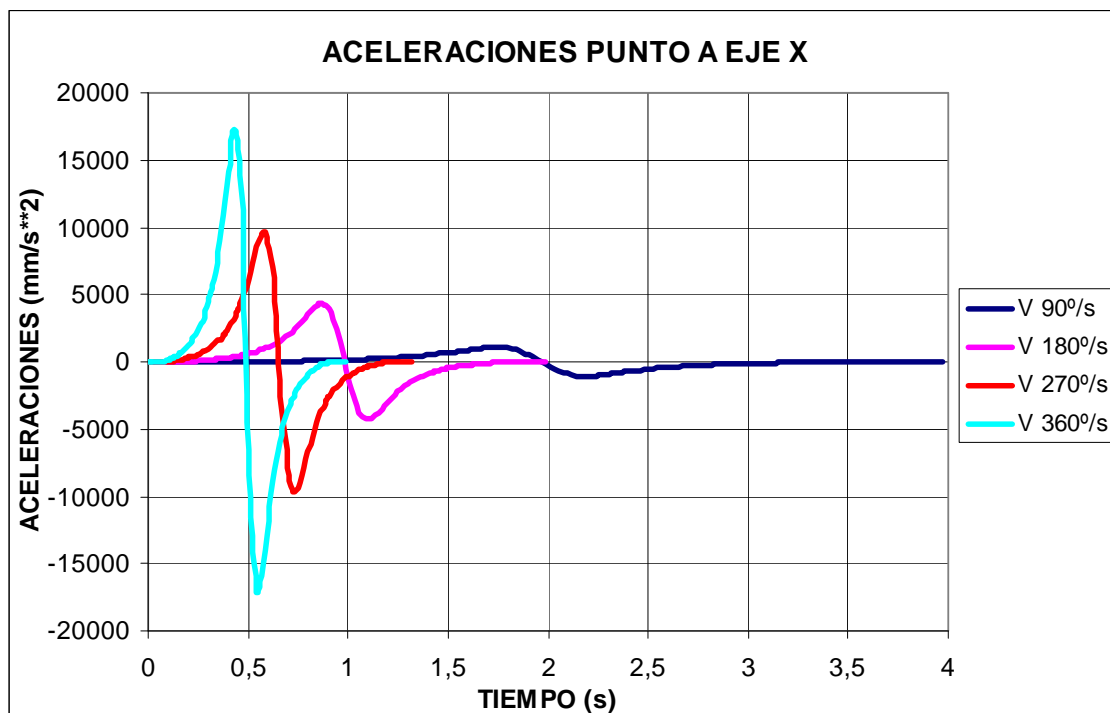
### Punto A eje X (Modelo original)



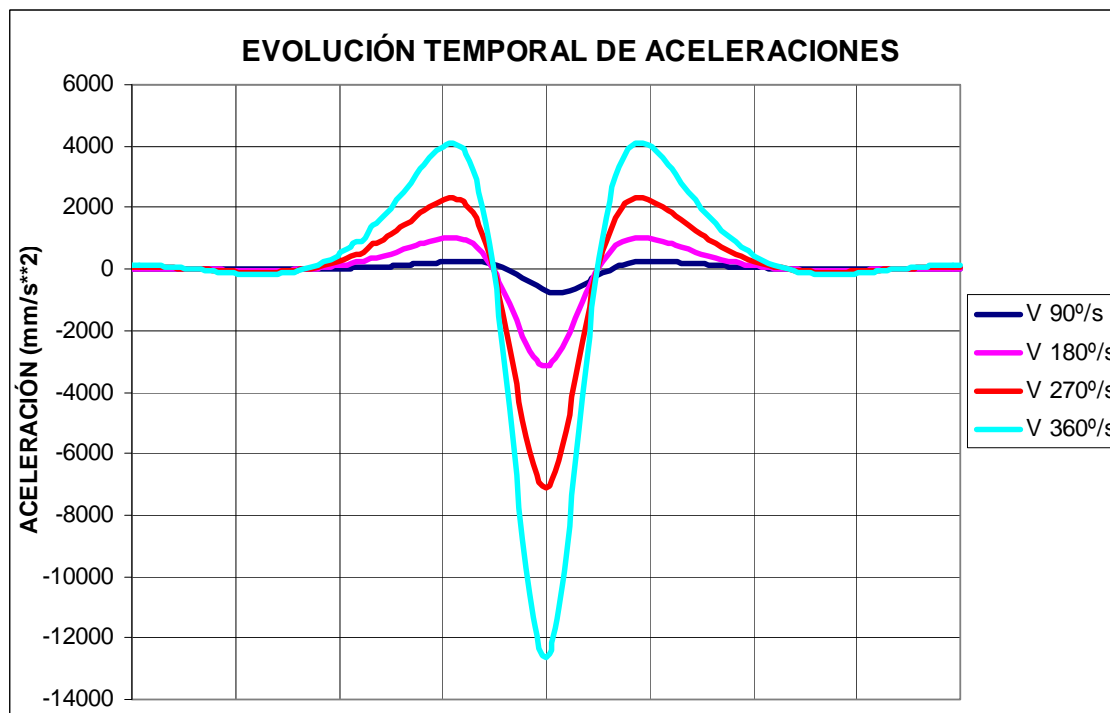
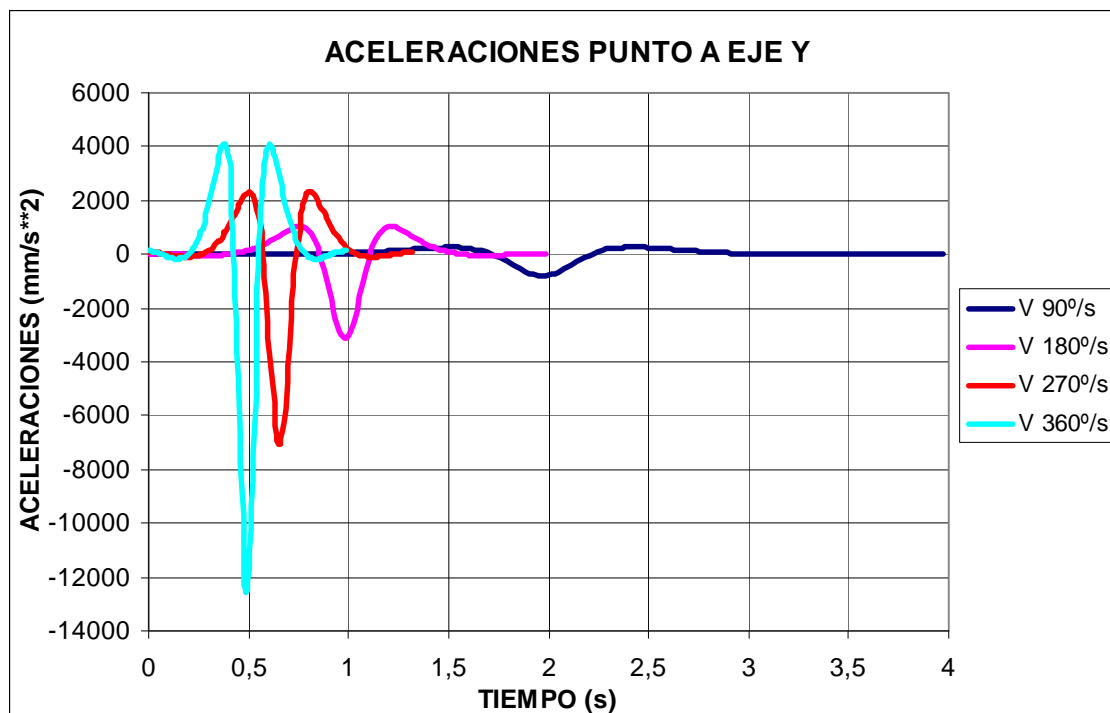
### Punto A eje Y (Modelo original)



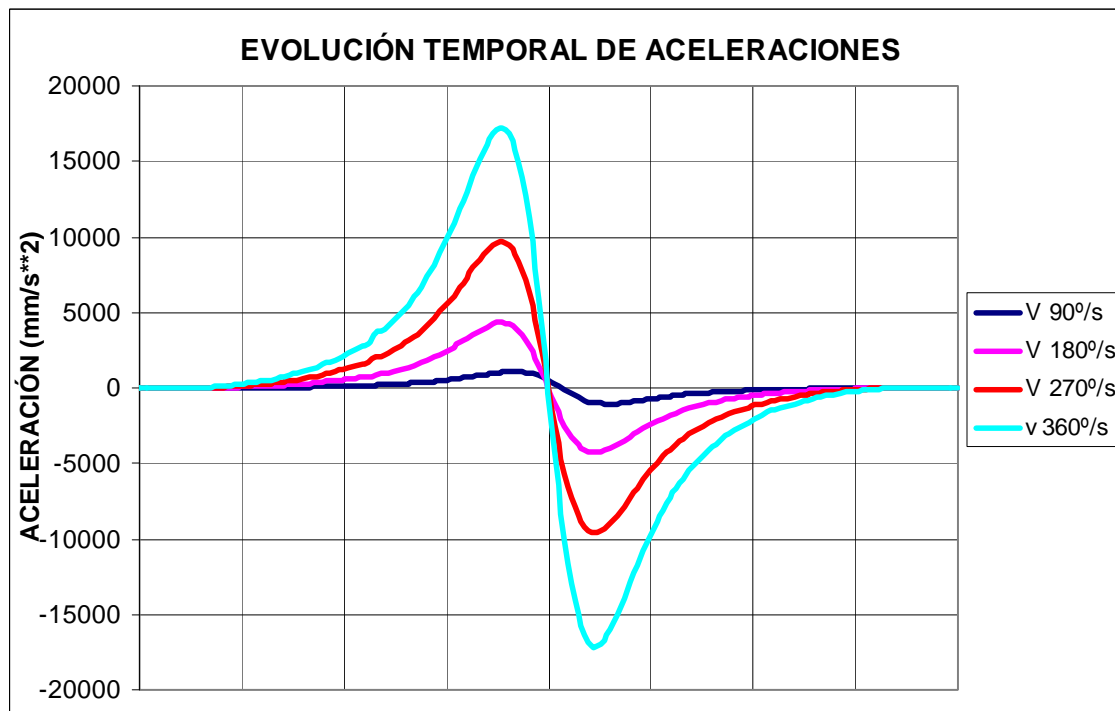
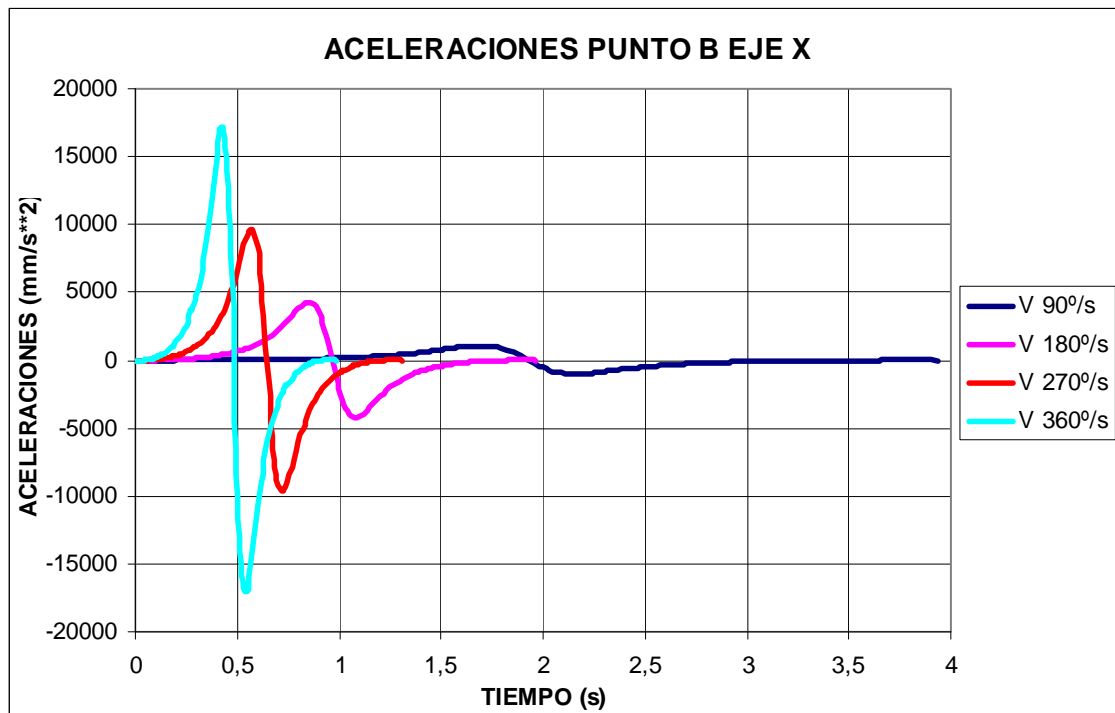
### Punto A eje X (Modelo modificado)



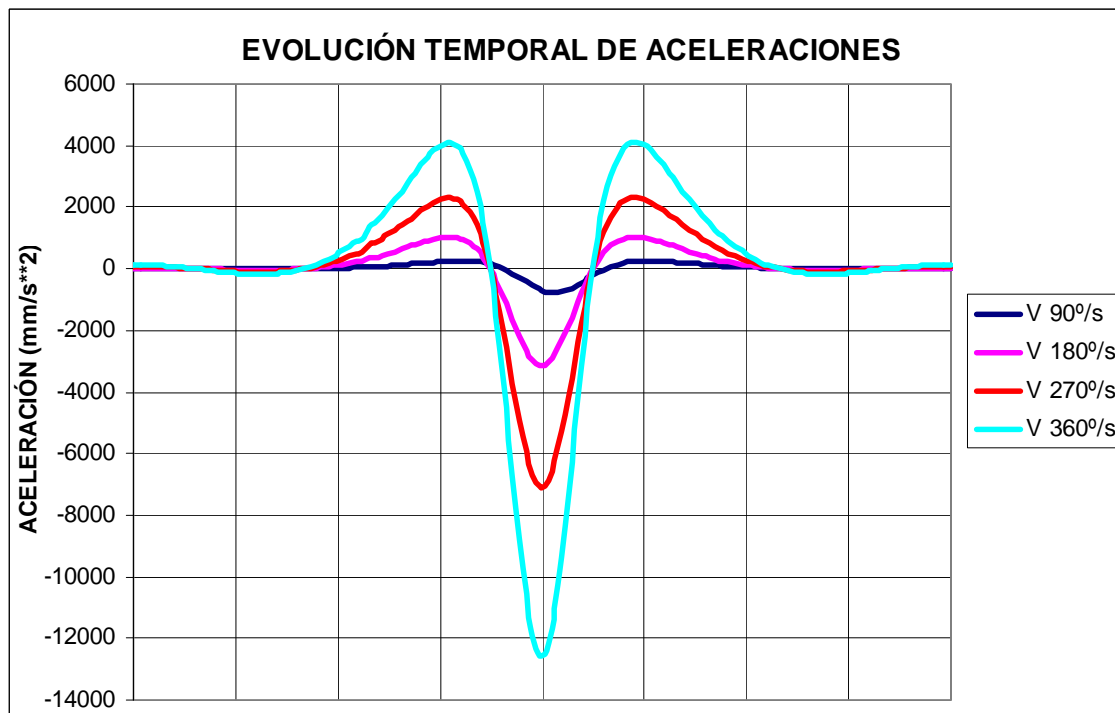
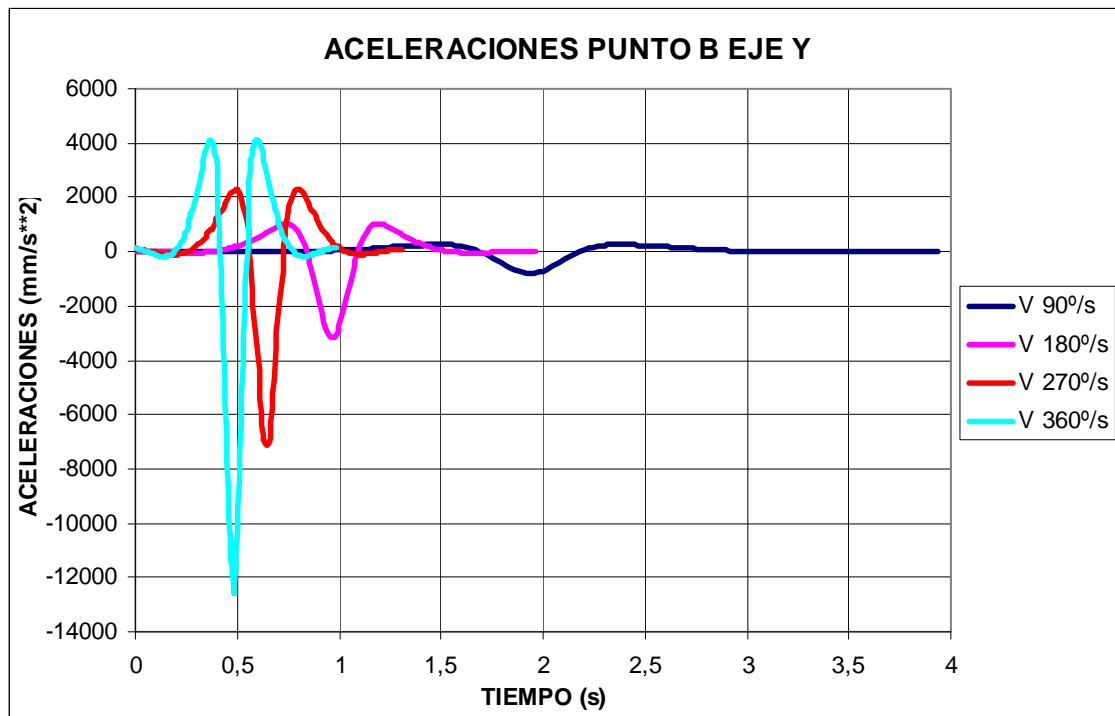
### Punto A eje Y (Modelo modificado)



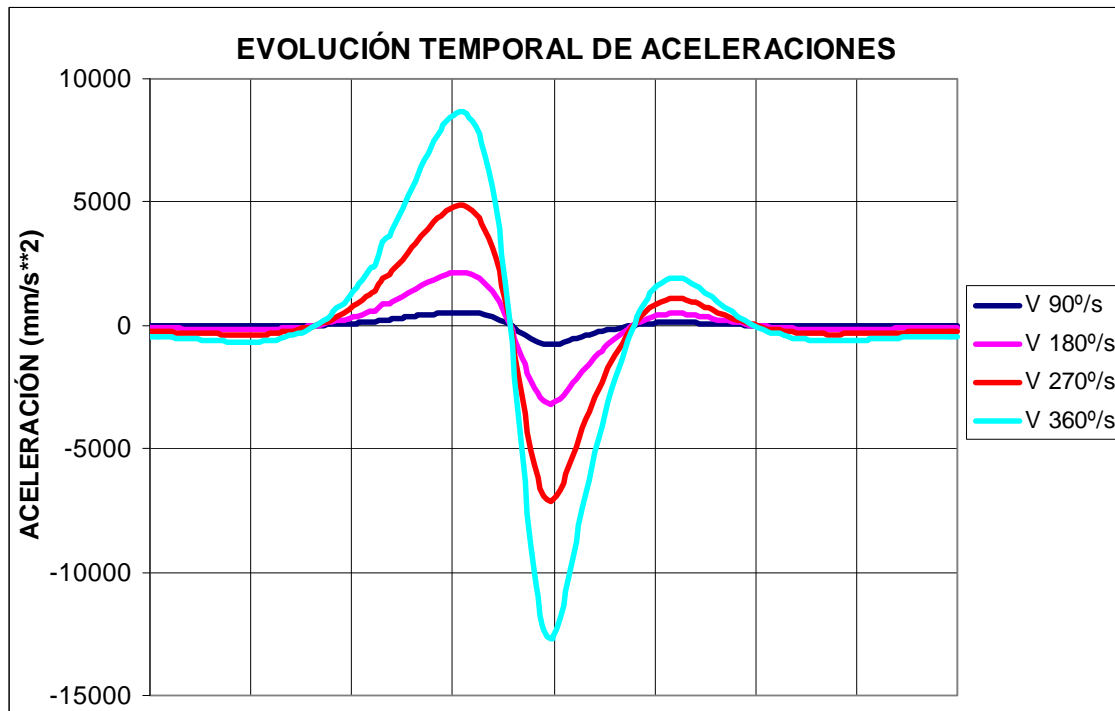
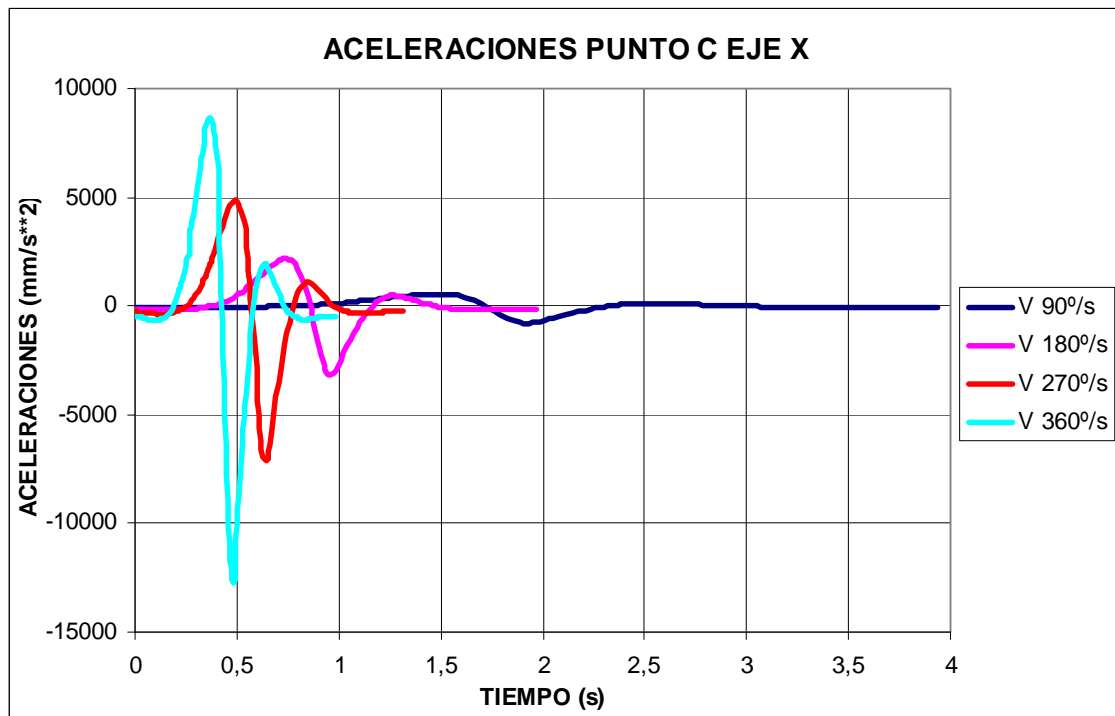
### Punto B eje X



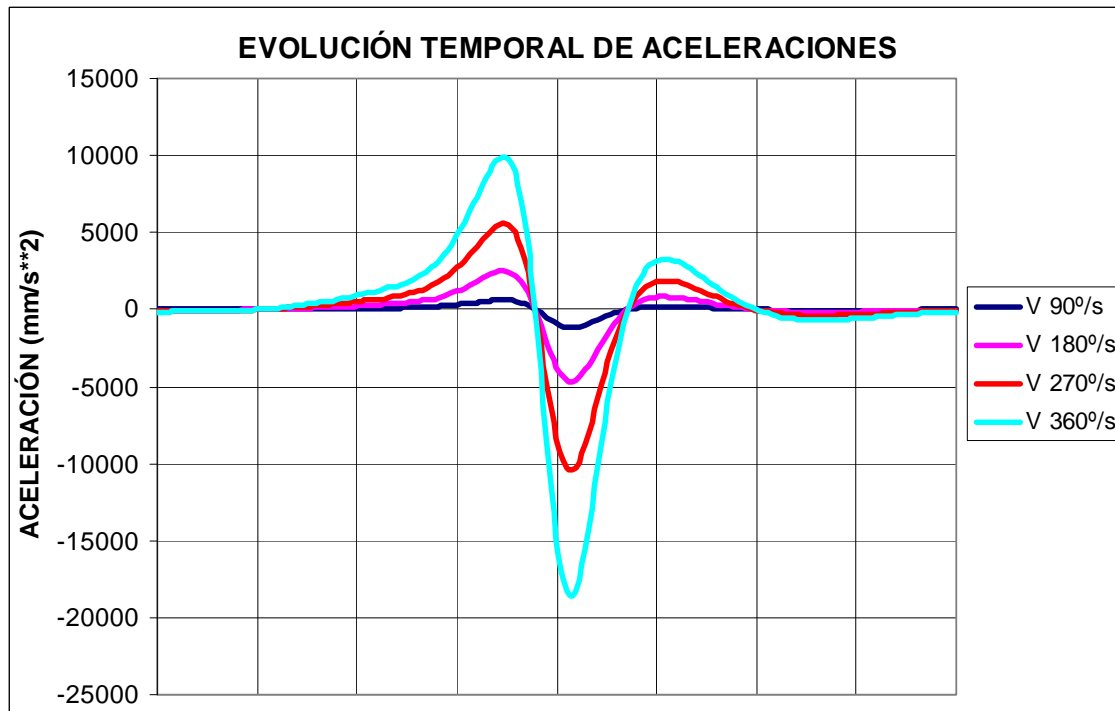
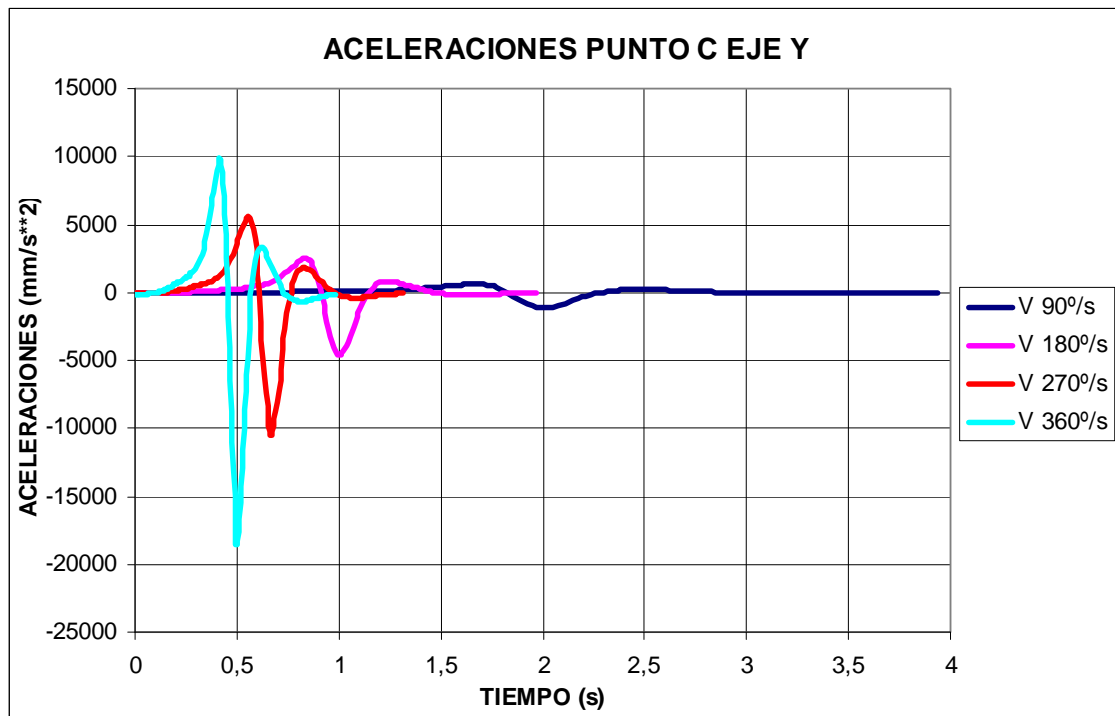
### Punto B eje Y



### Punto C eje X

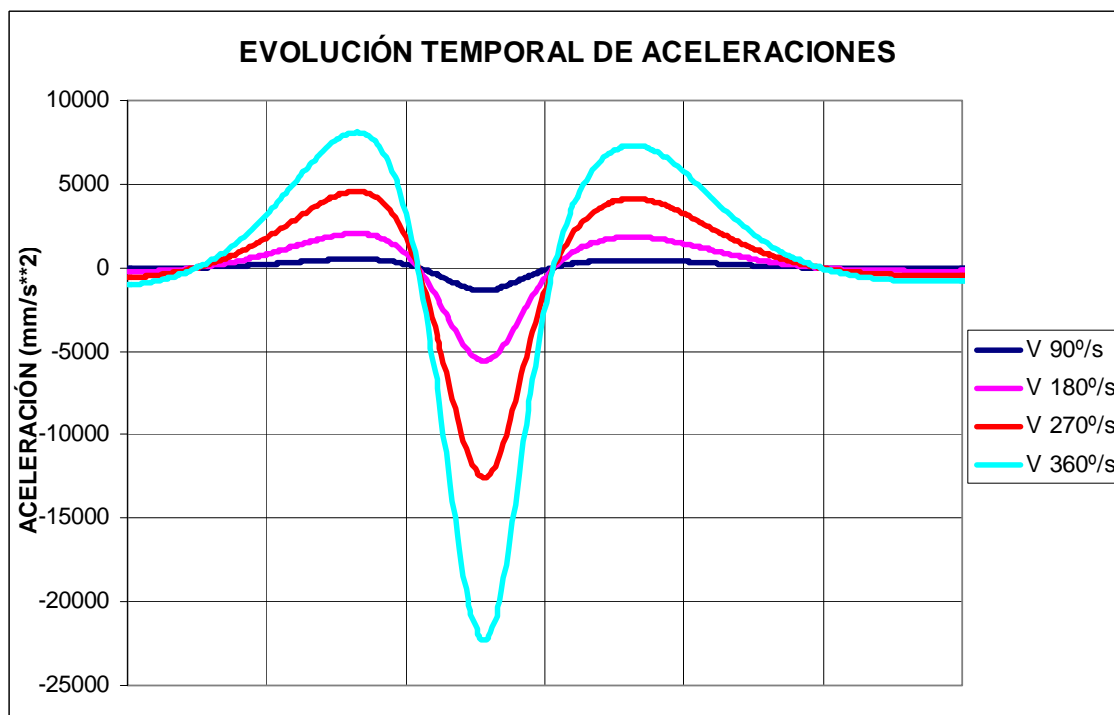
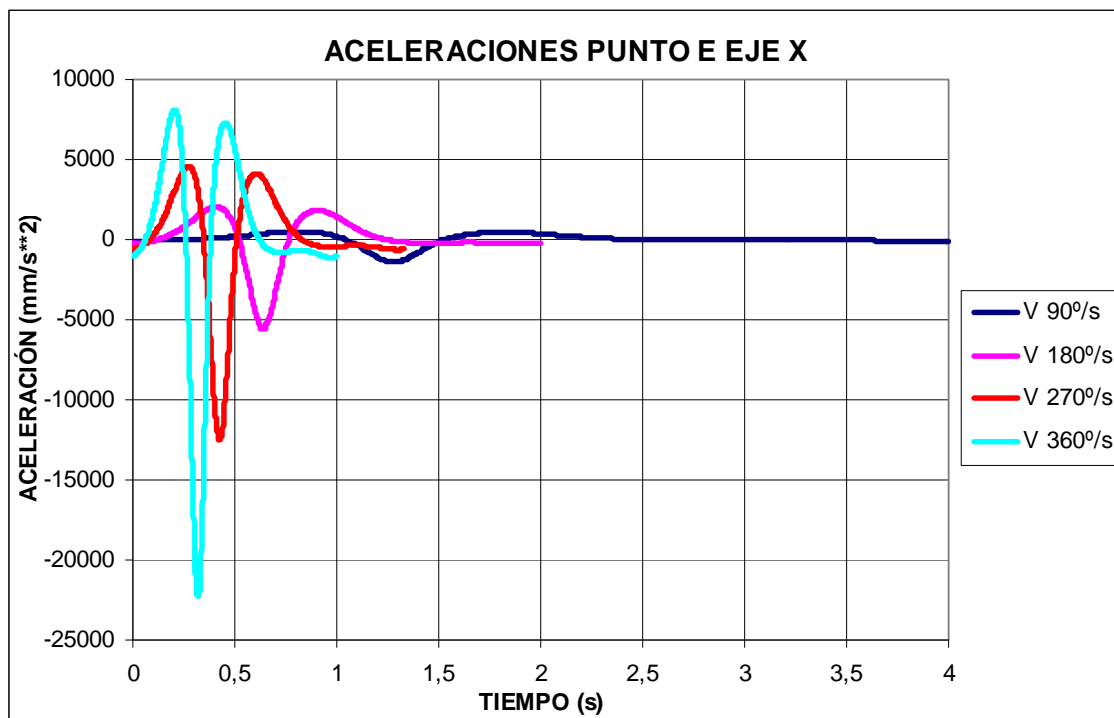


### Punto C eje Y

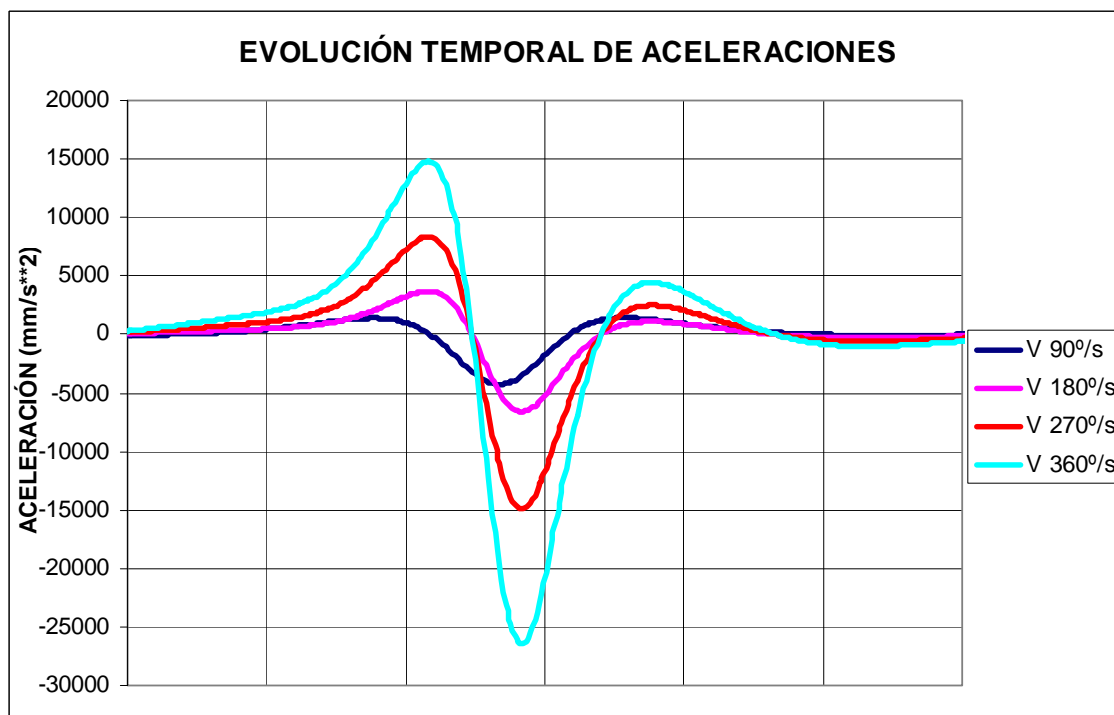
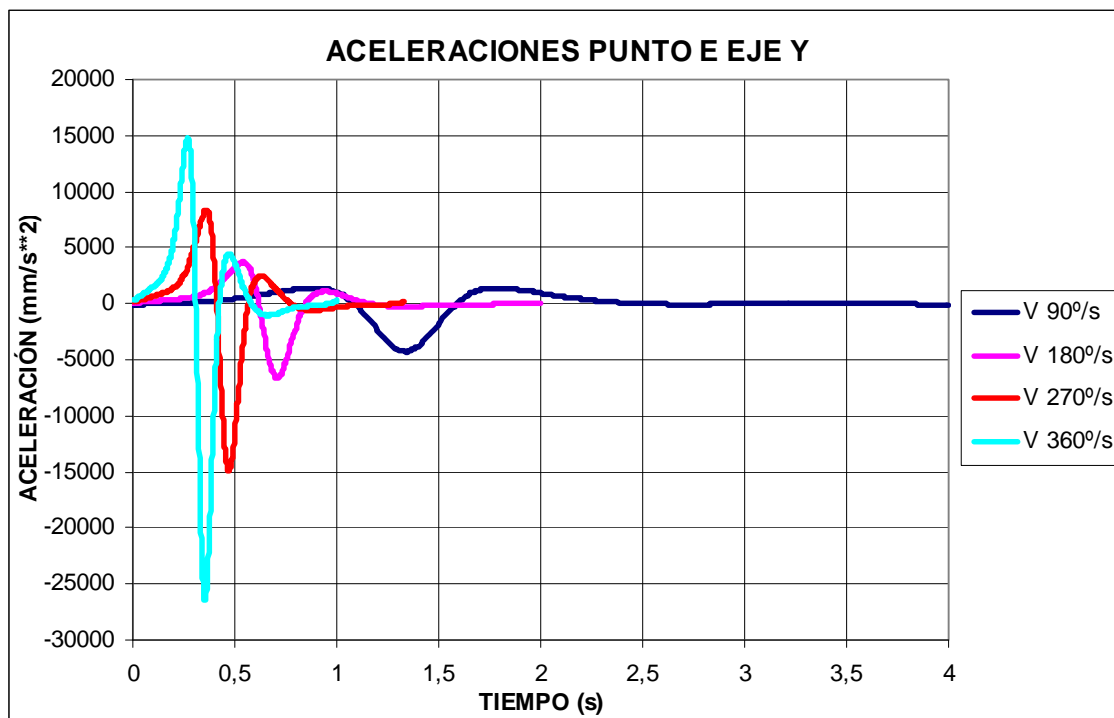




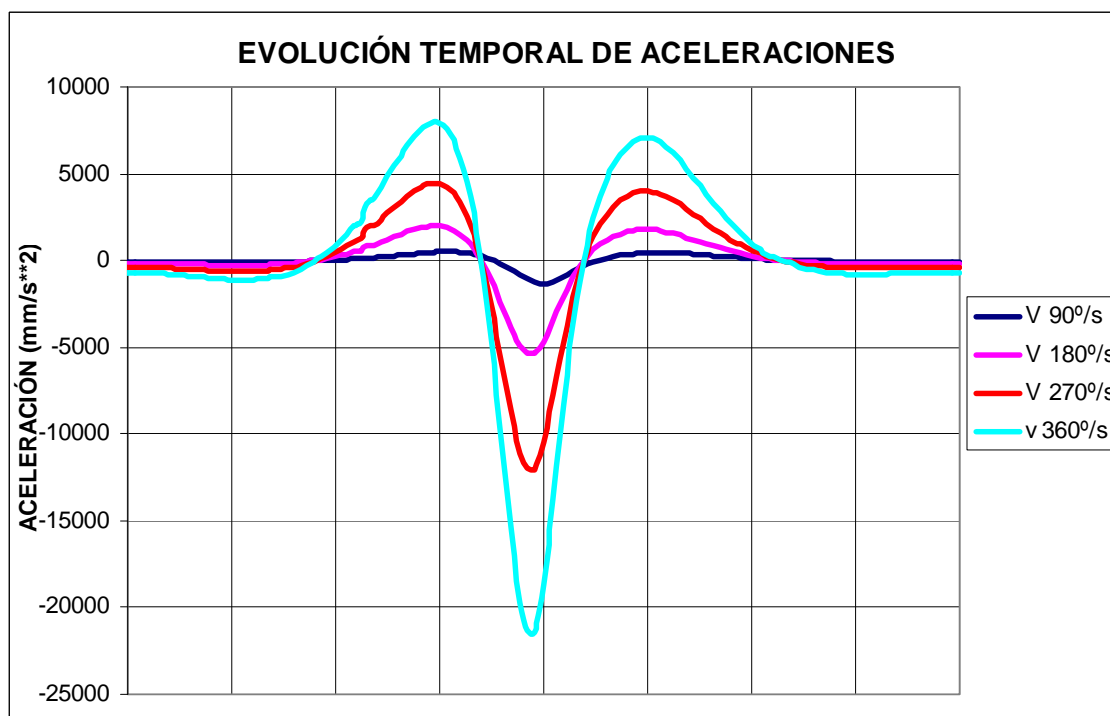
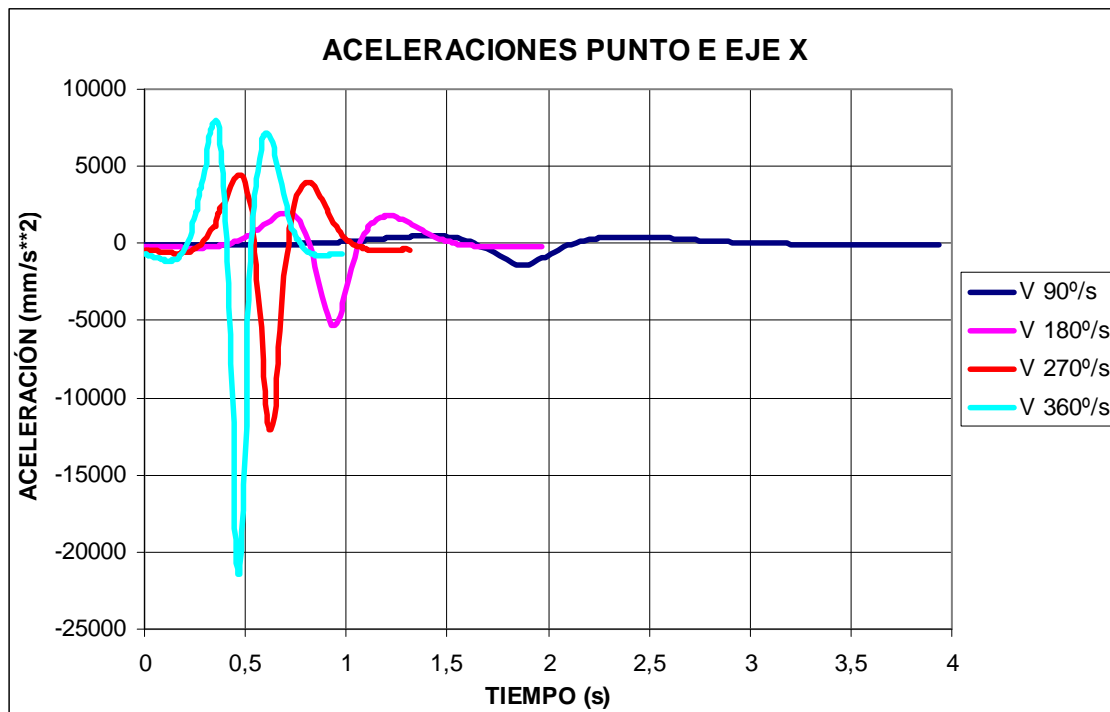
### Punto E eje X (Modelo original)



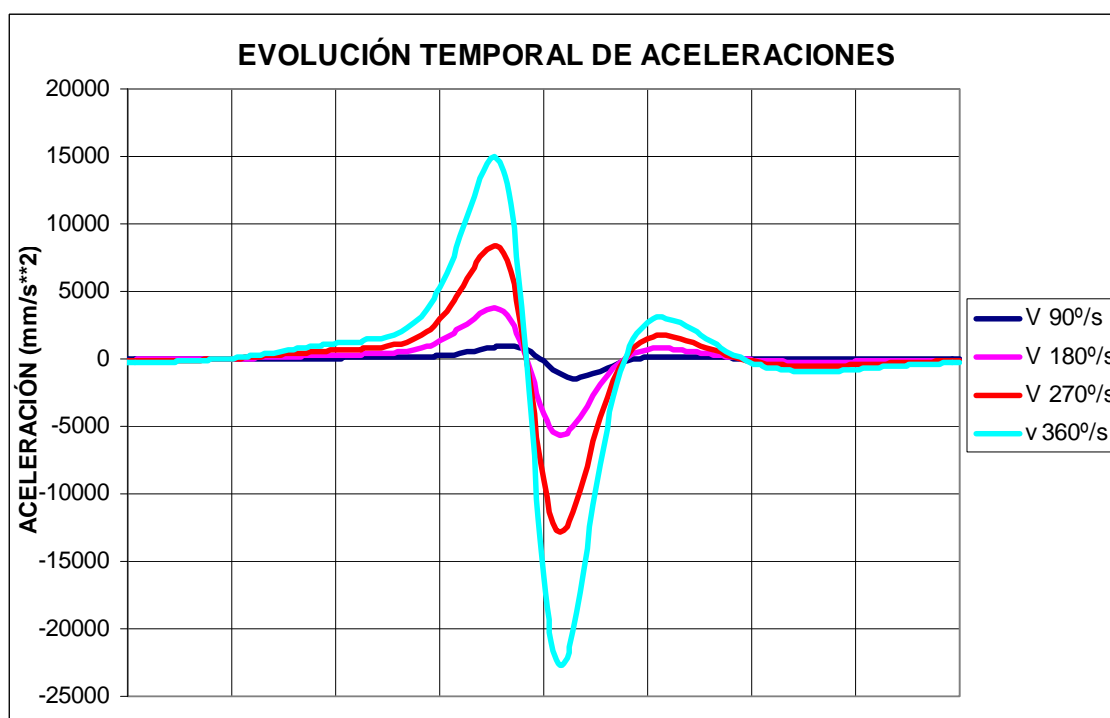
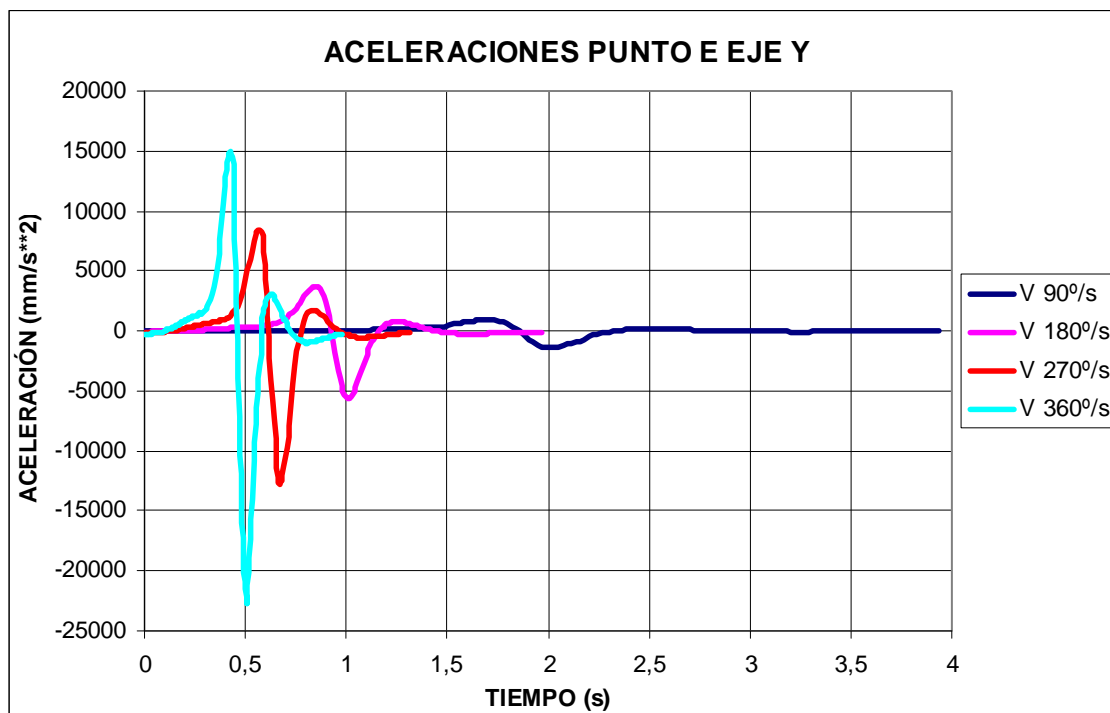
### Punto E eje Y (Modelo original)



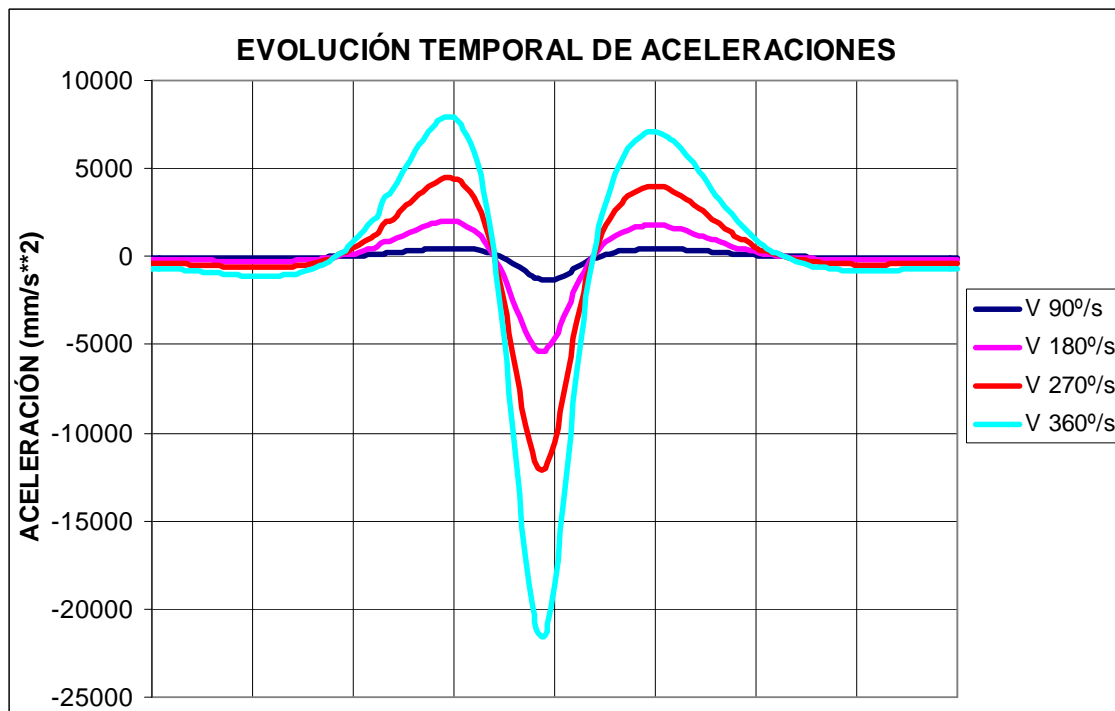
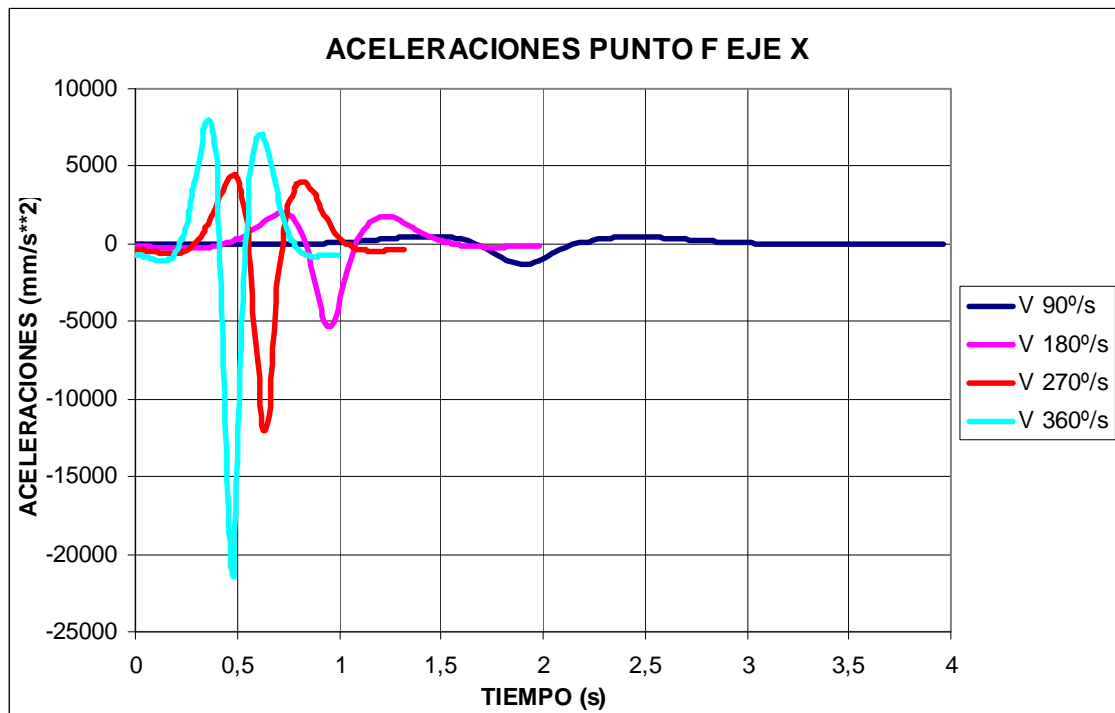
**Punto E eje X (Modelo modificado)**



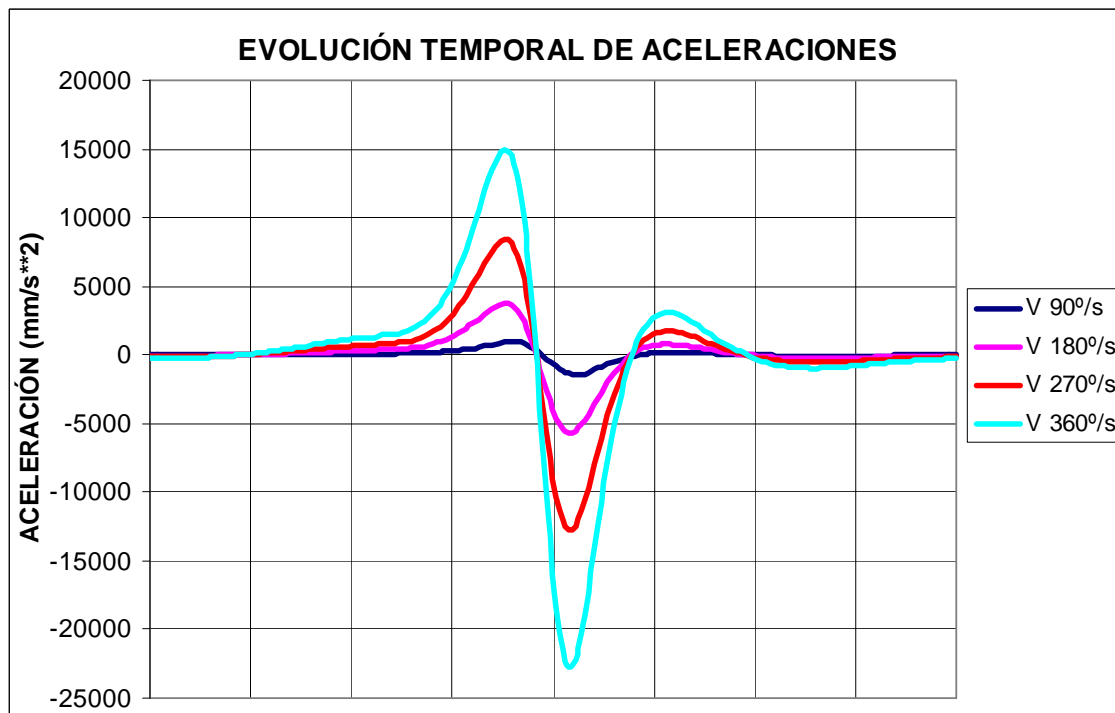
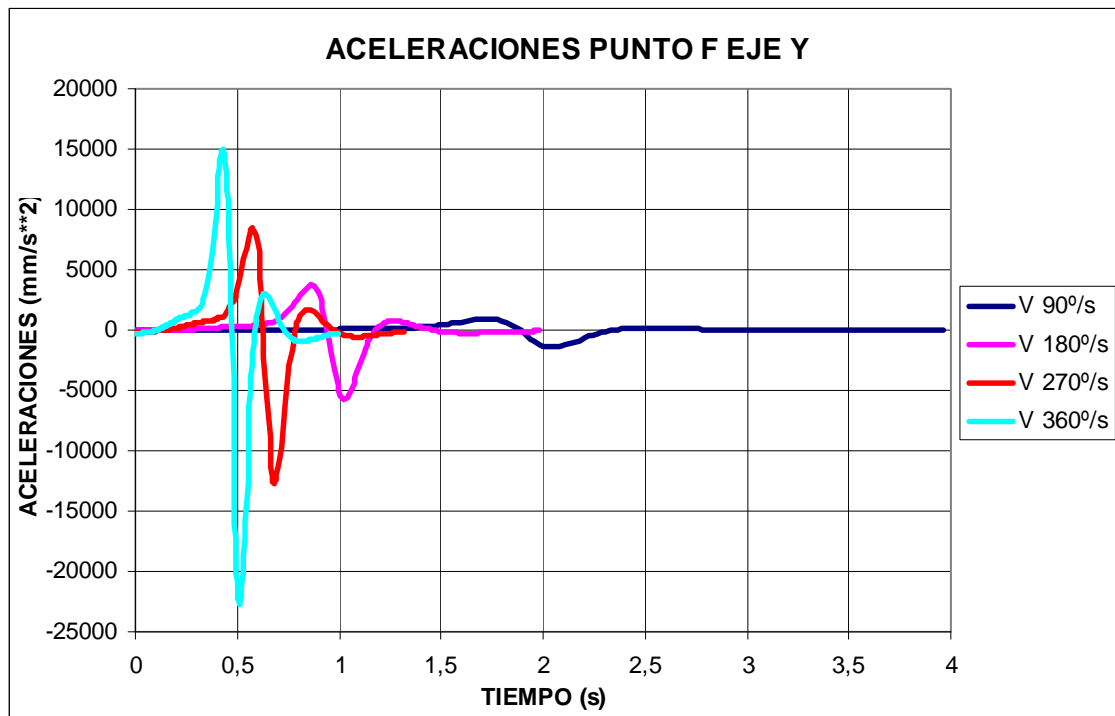
### Punto E eje Y (Modelo modificado)



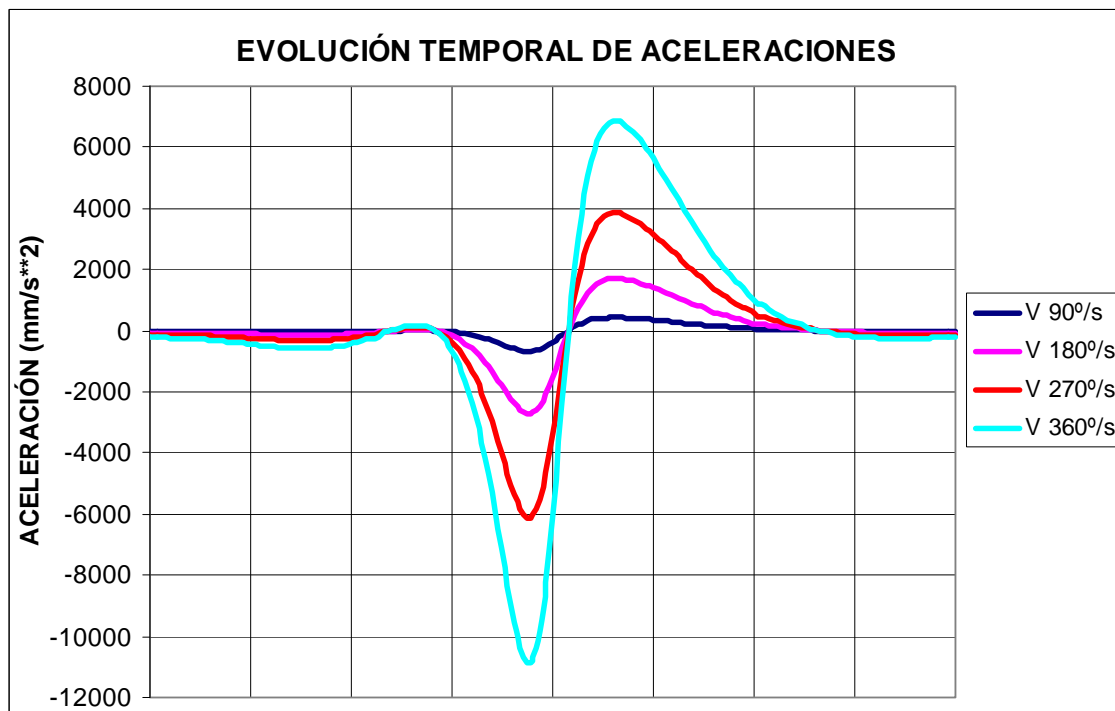
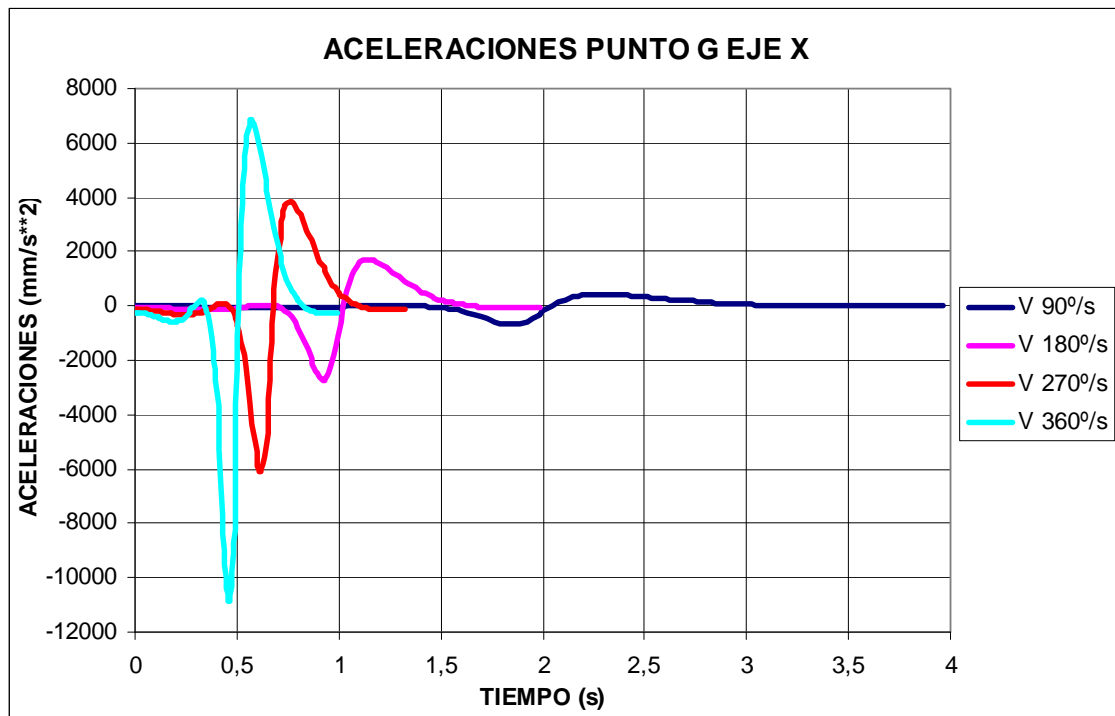
### Punto F eje X



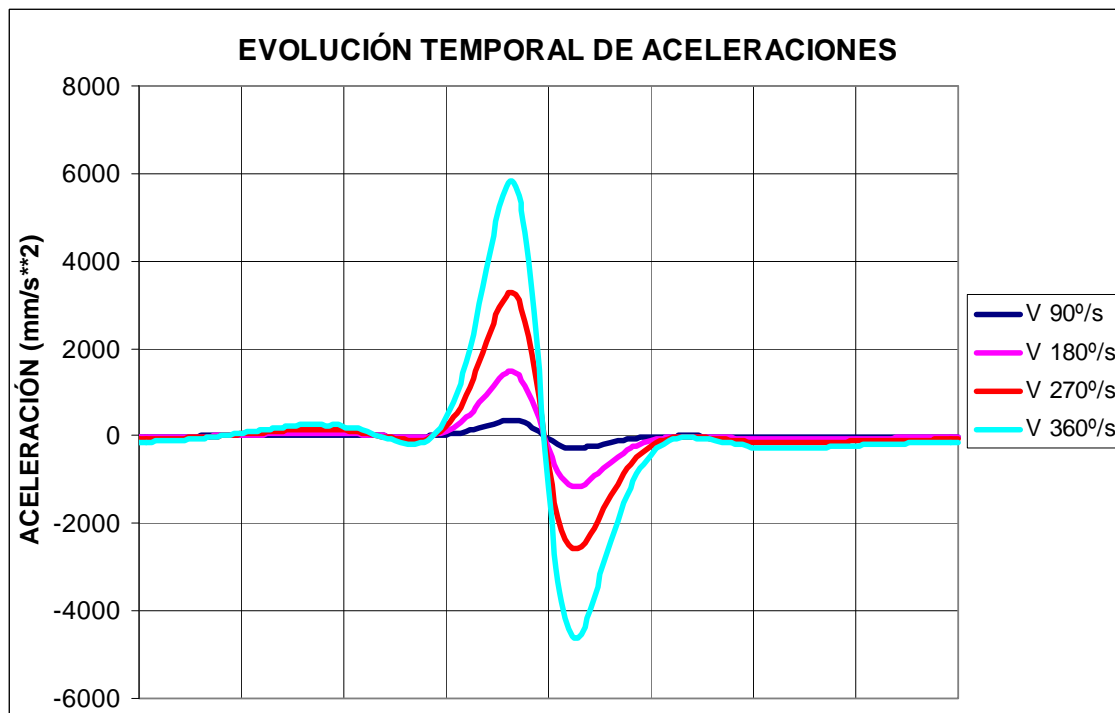
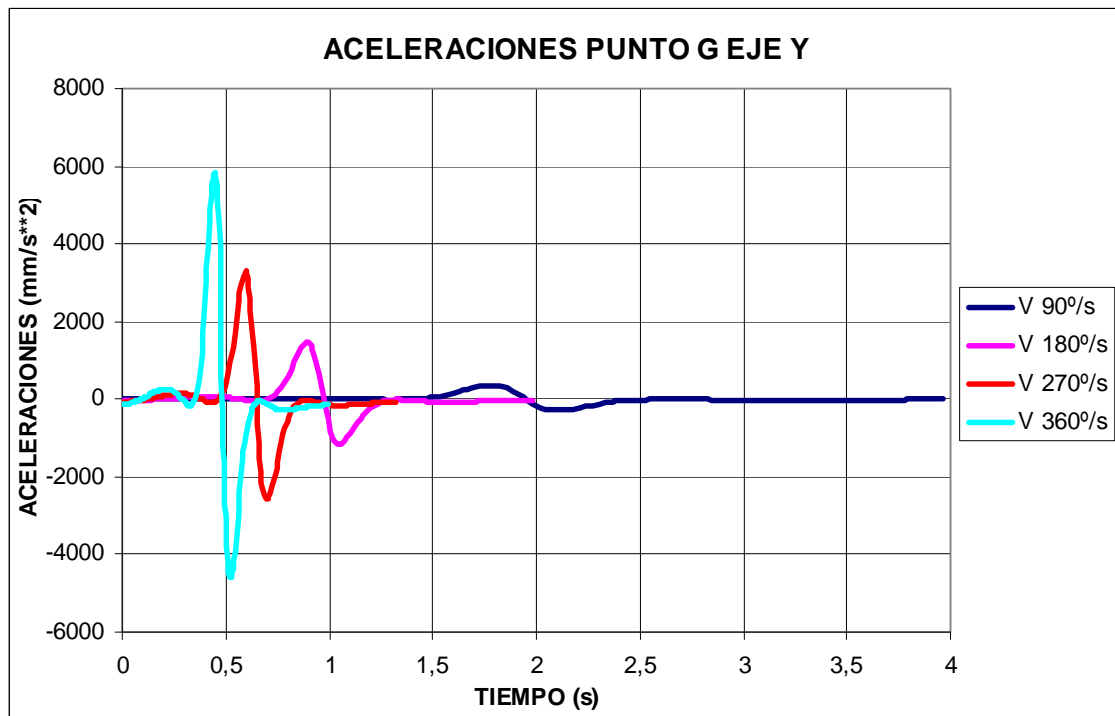
### Punto F eje Y



### Punto G eje X

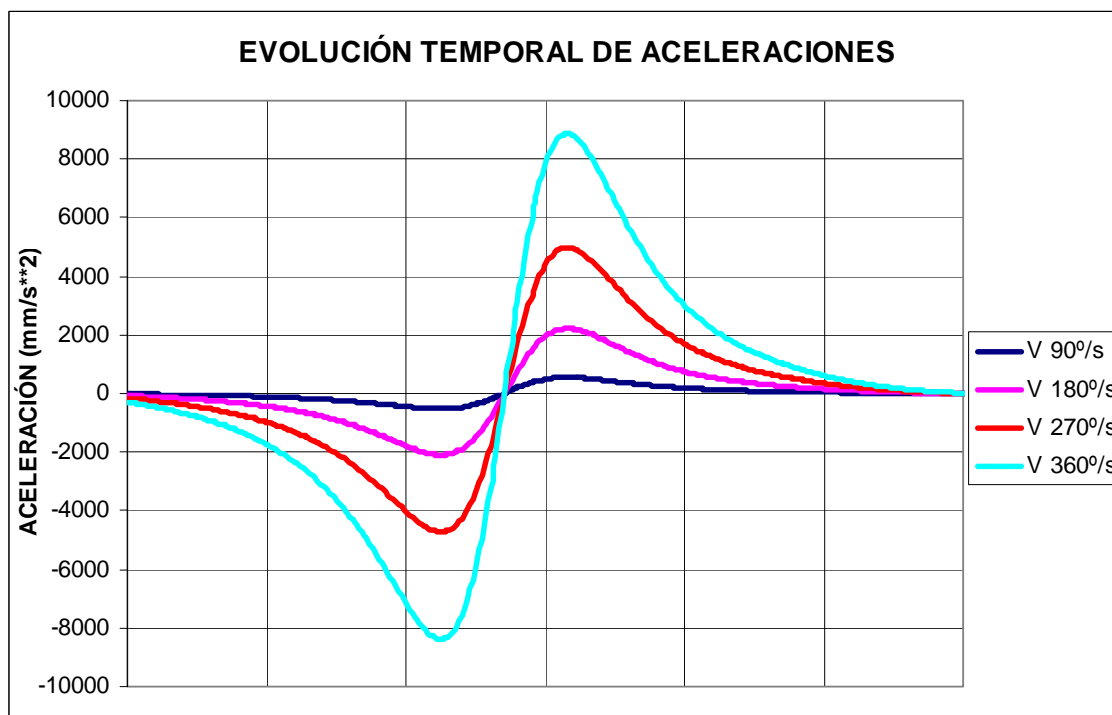
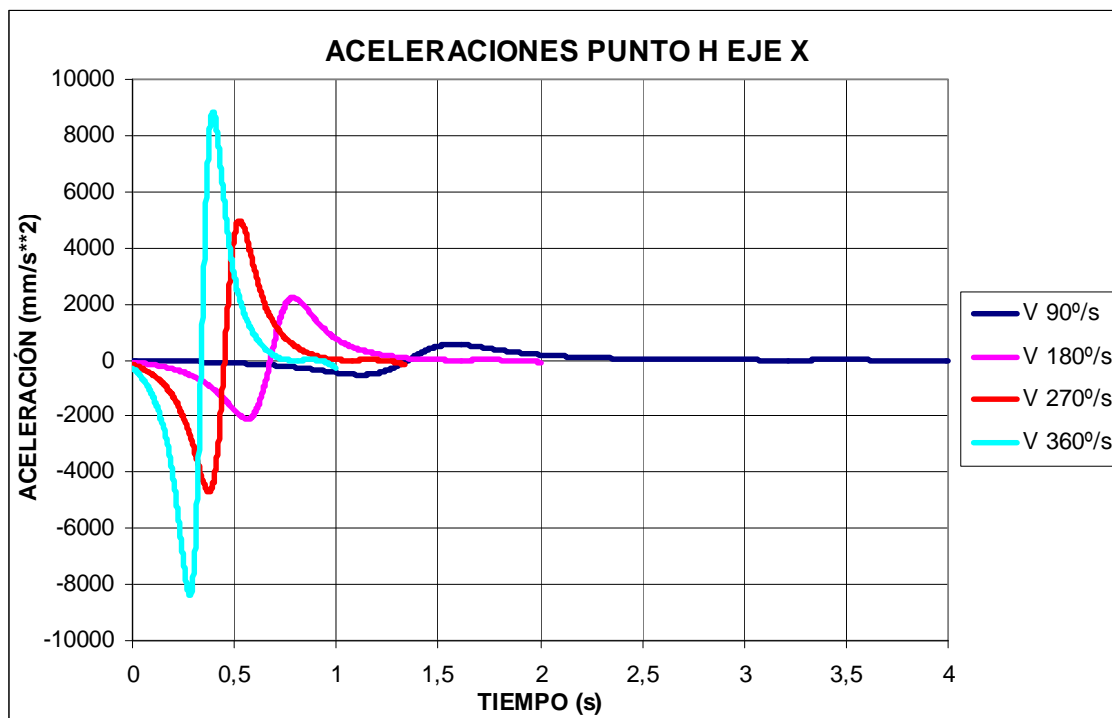


### Punto G eje Y

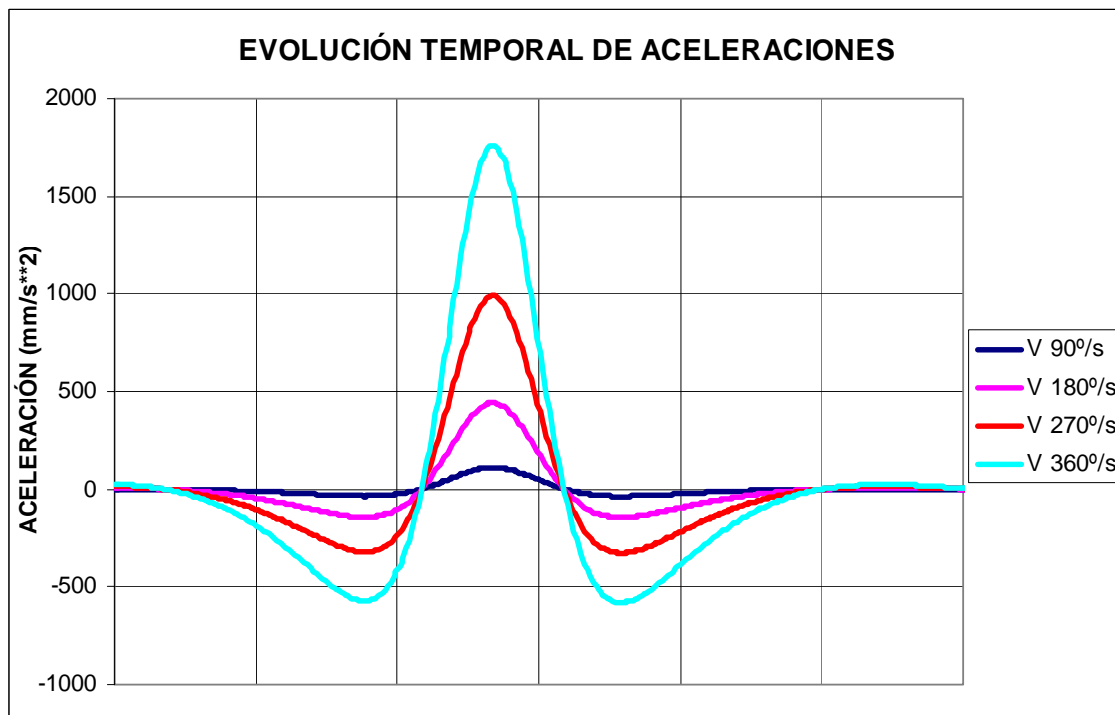
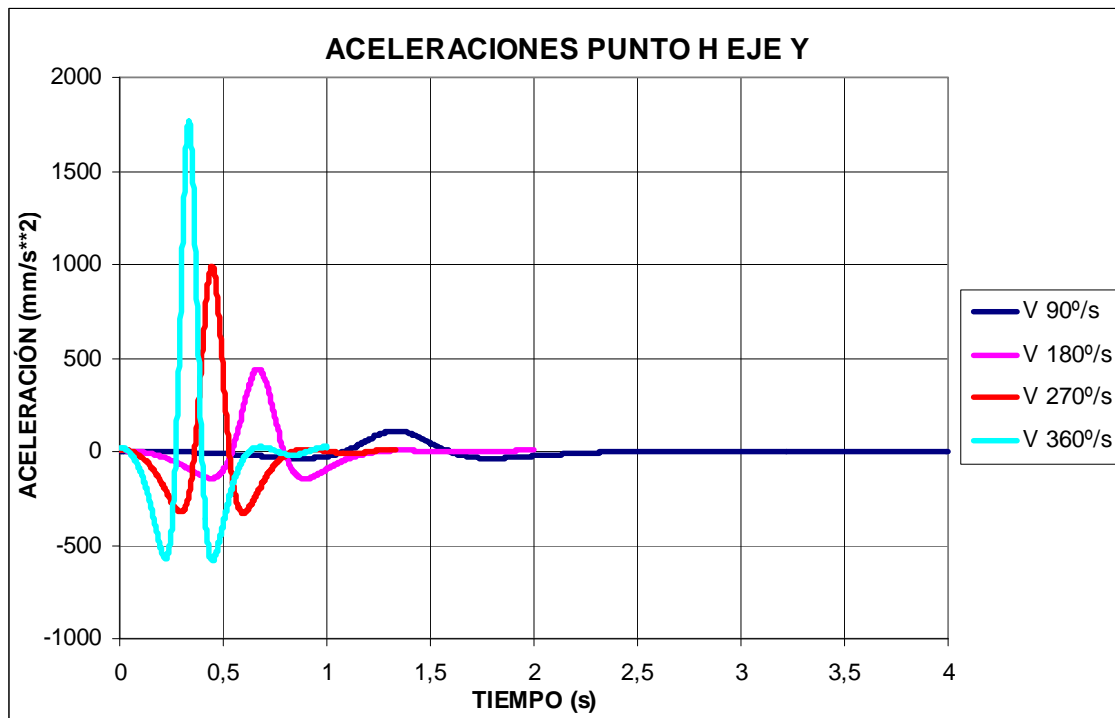




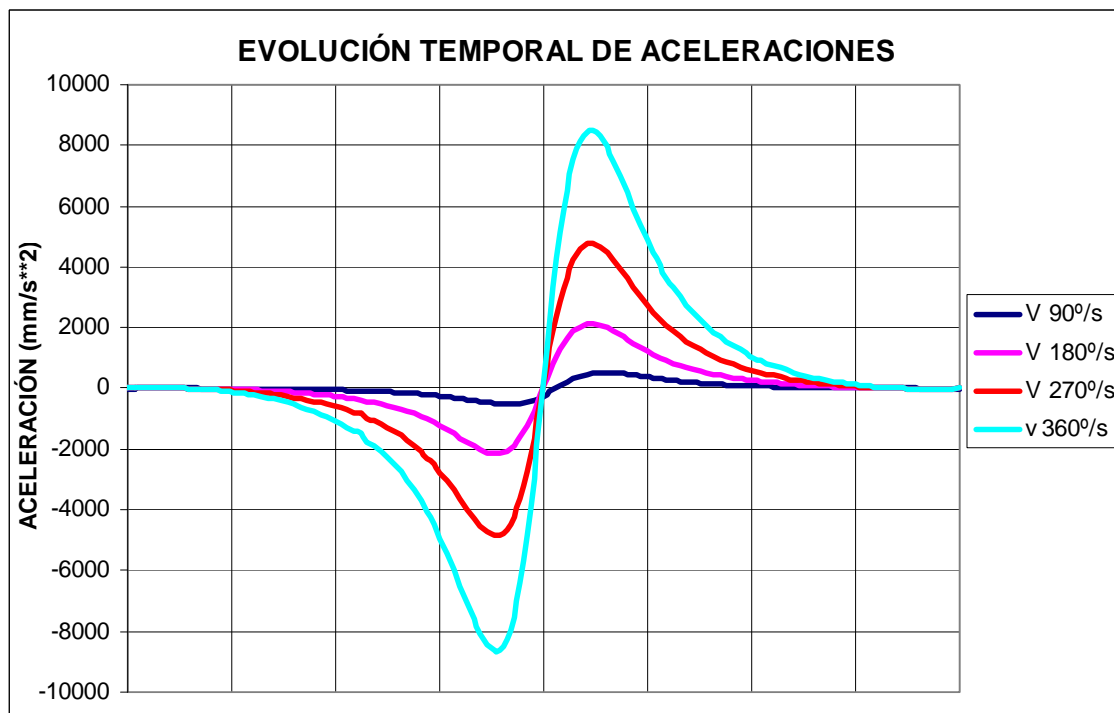
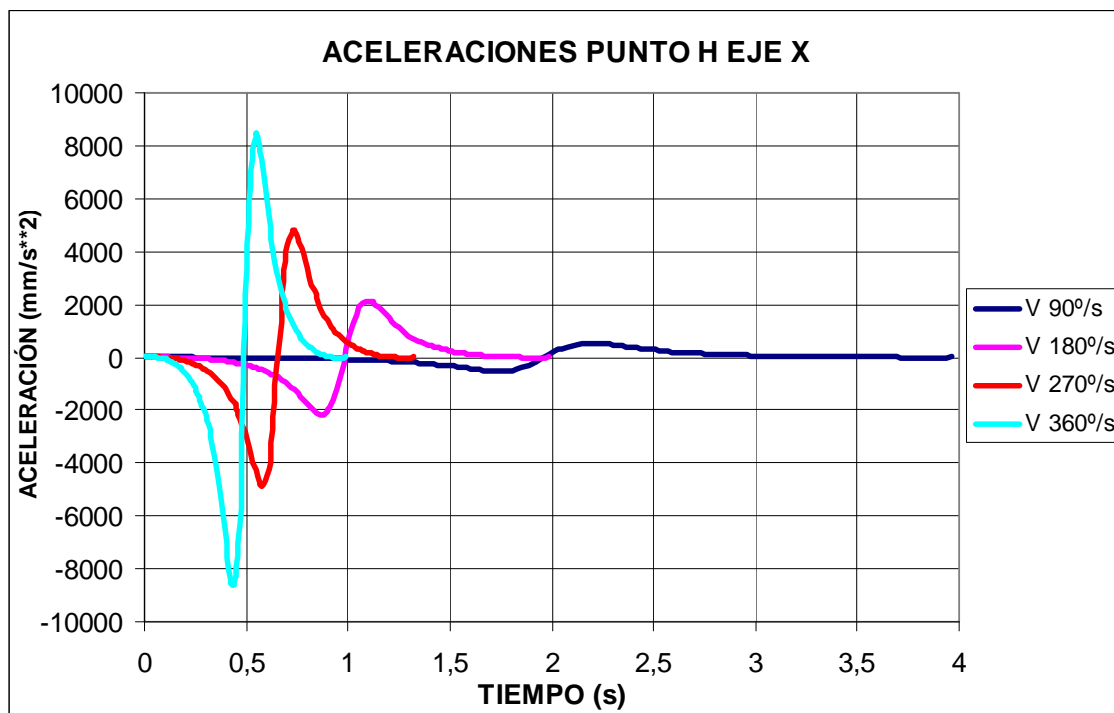
### Punto H eje X (Modelo original)



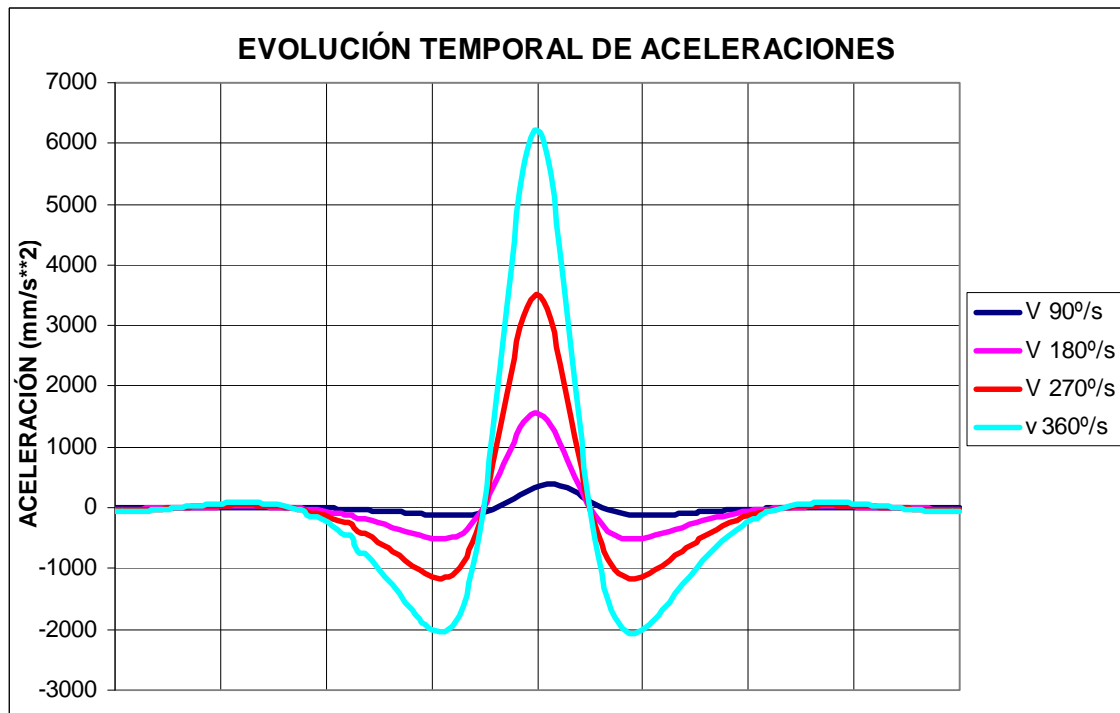
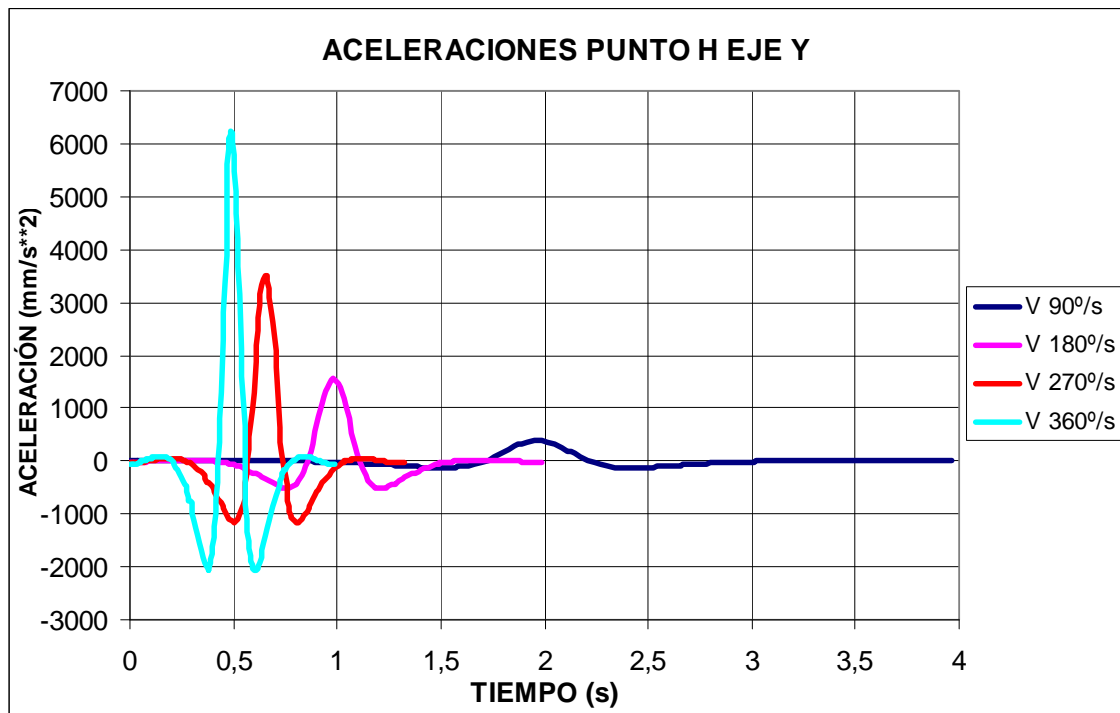
### Punto H eje Y (Modelo original)



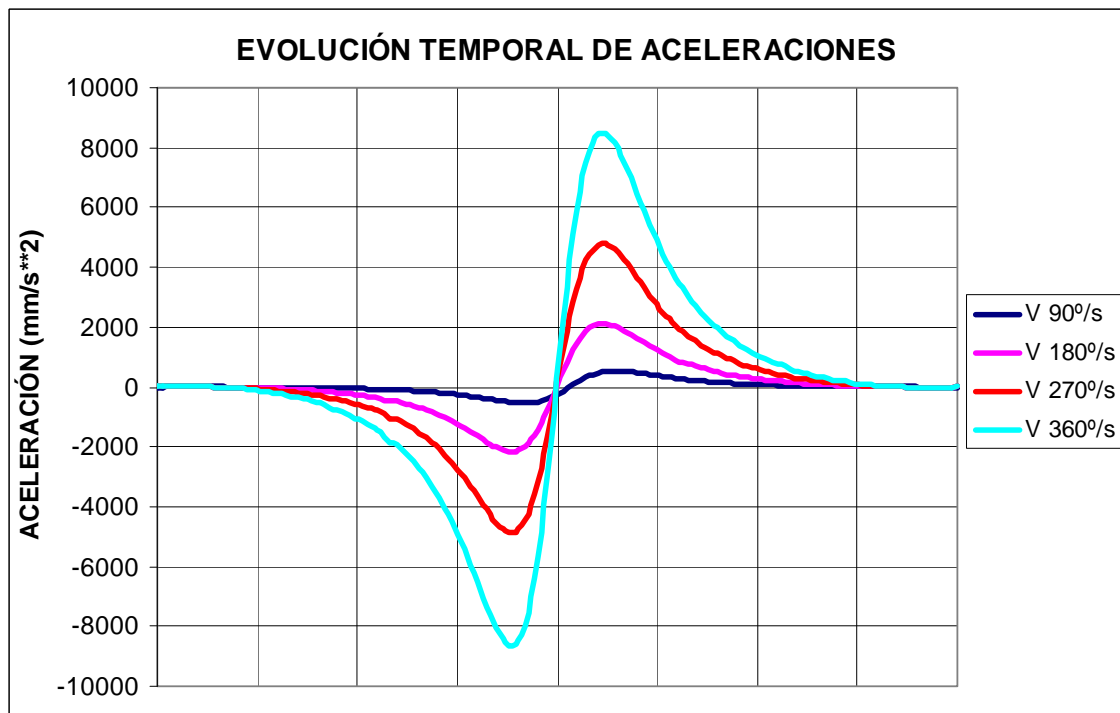
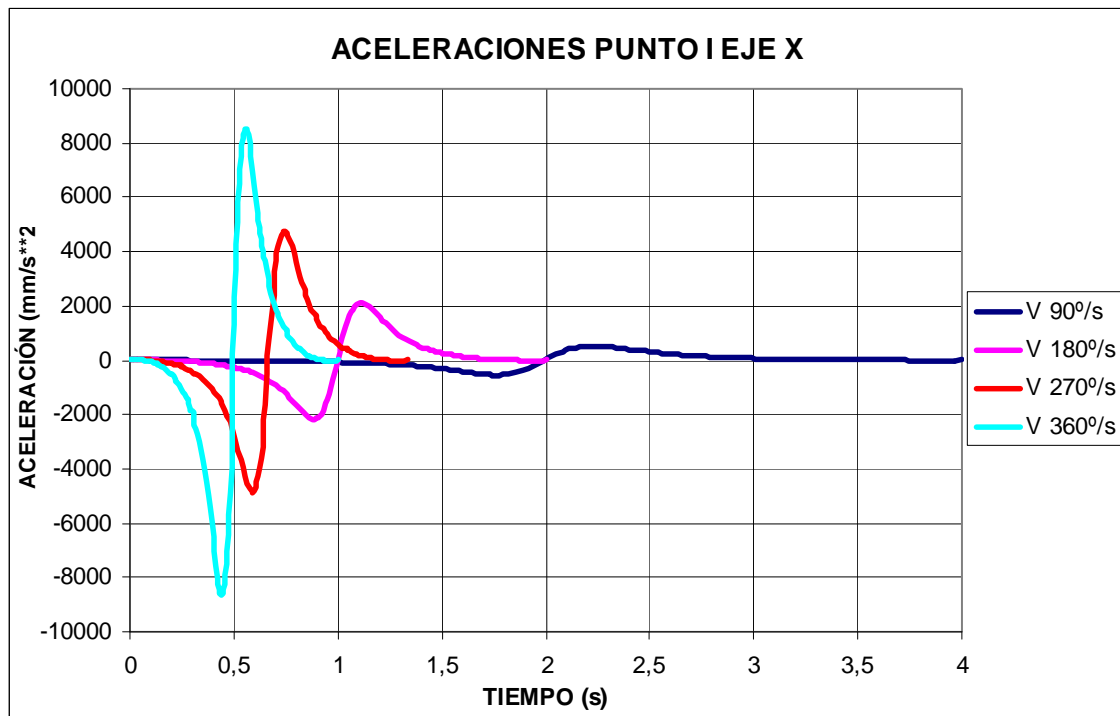
### Punto H eje X (Modelo modificado)



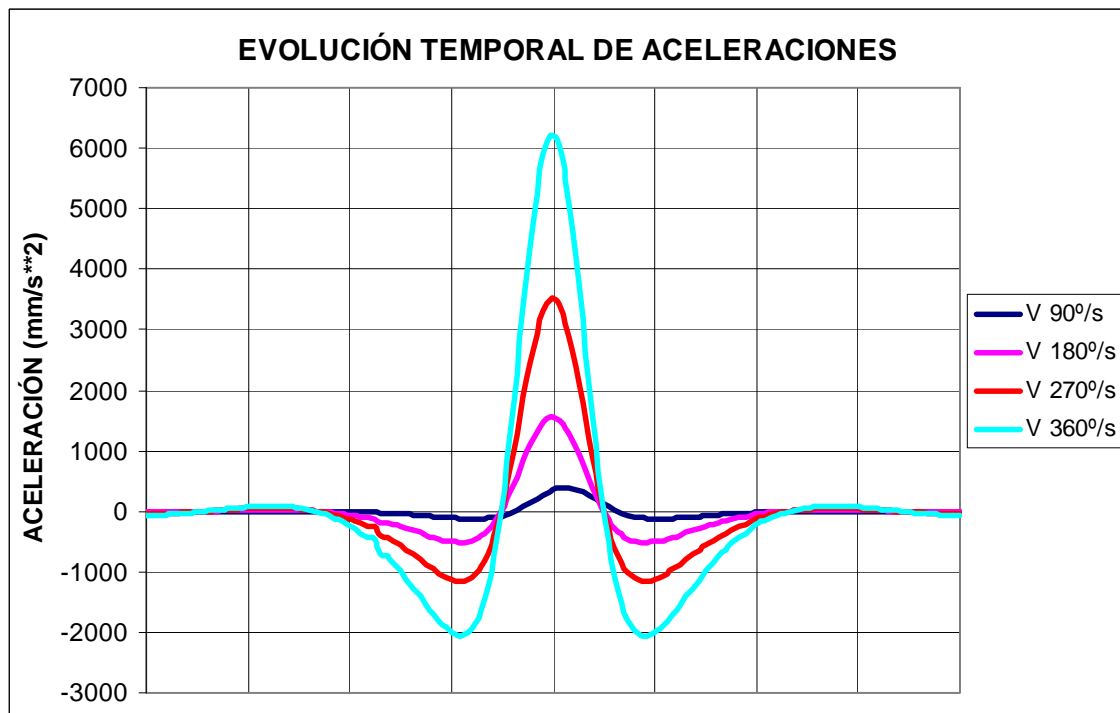
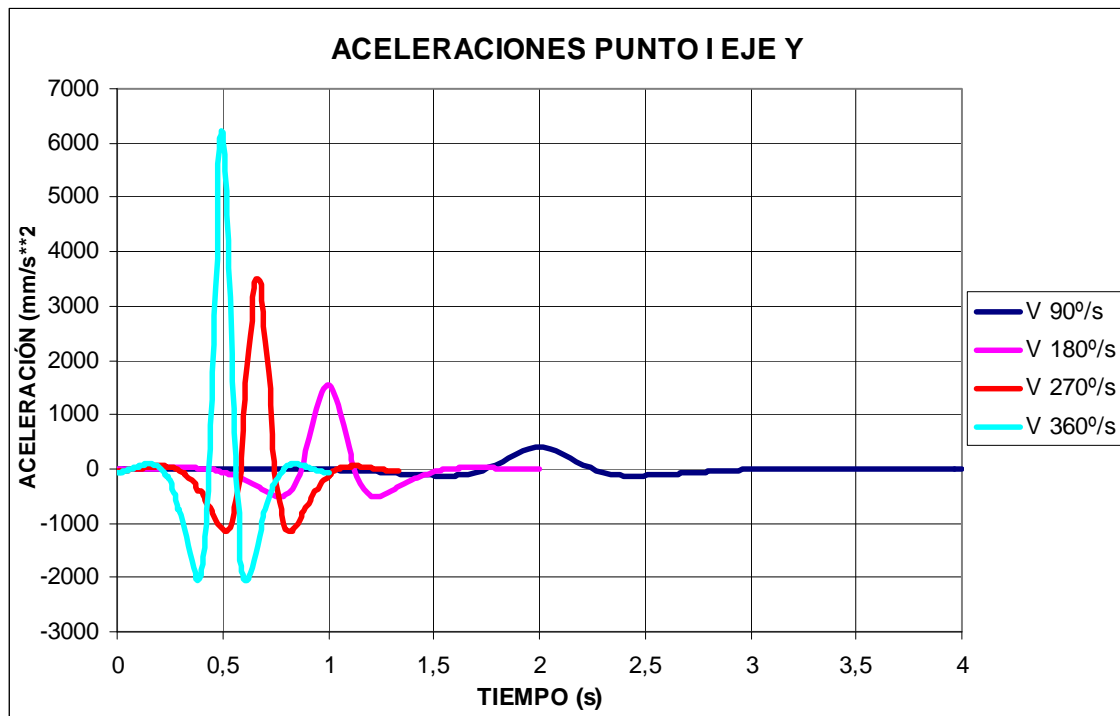
### Punto H eje Y (Modelo modificado)



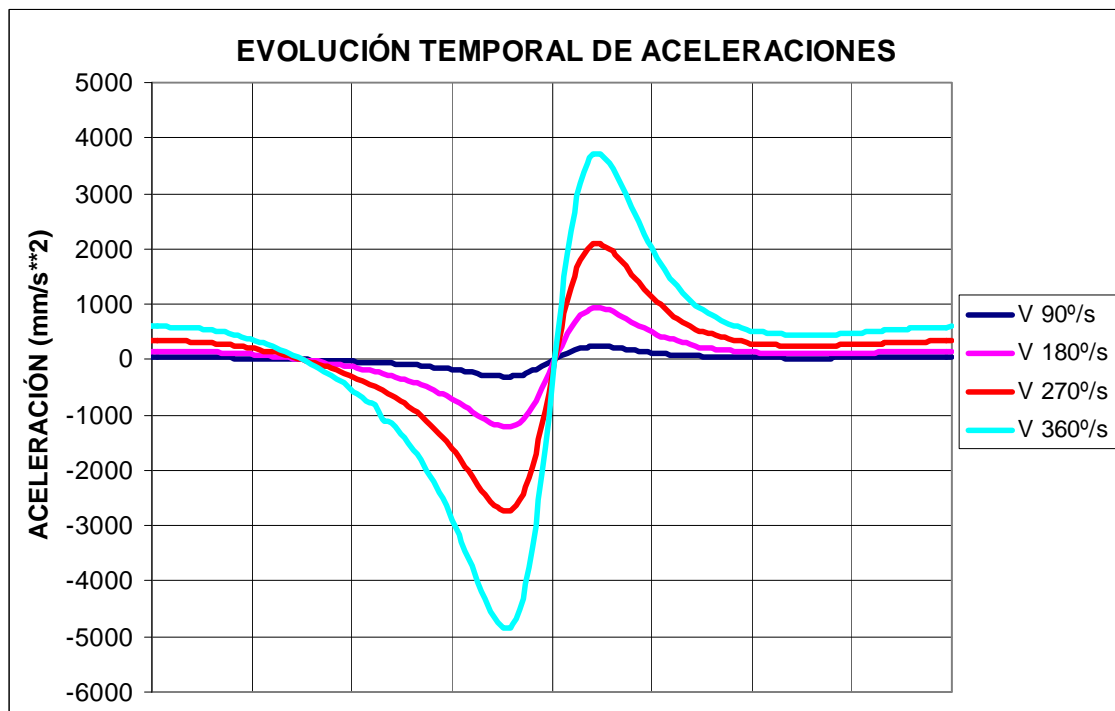
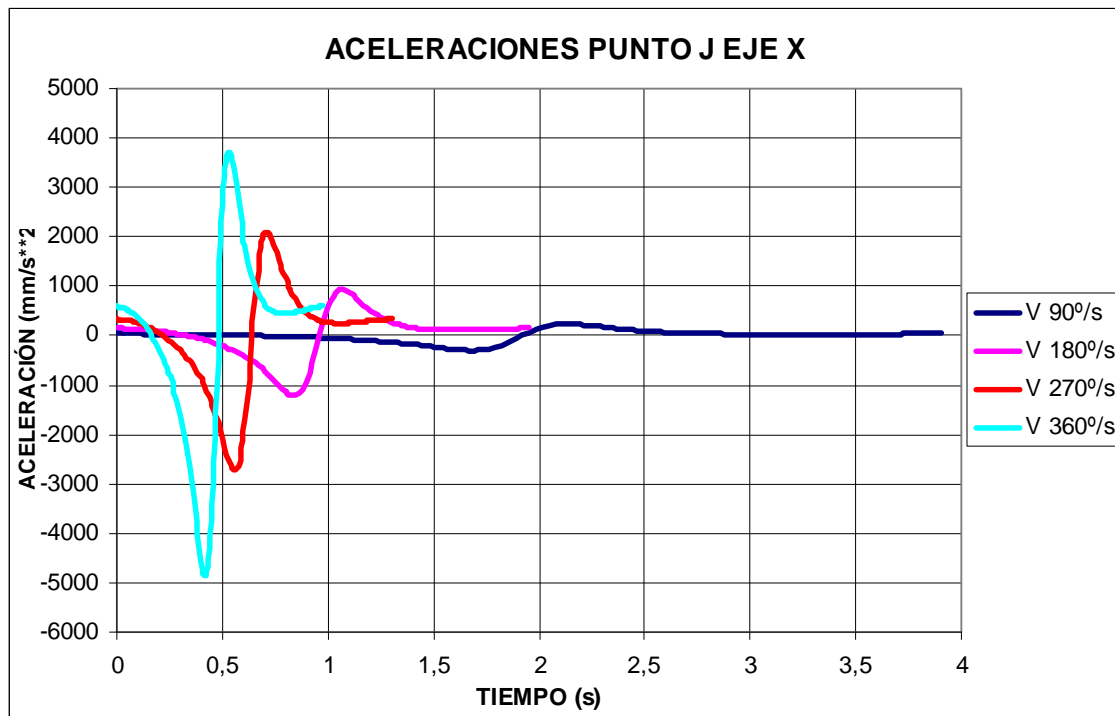
### Punto I eje X



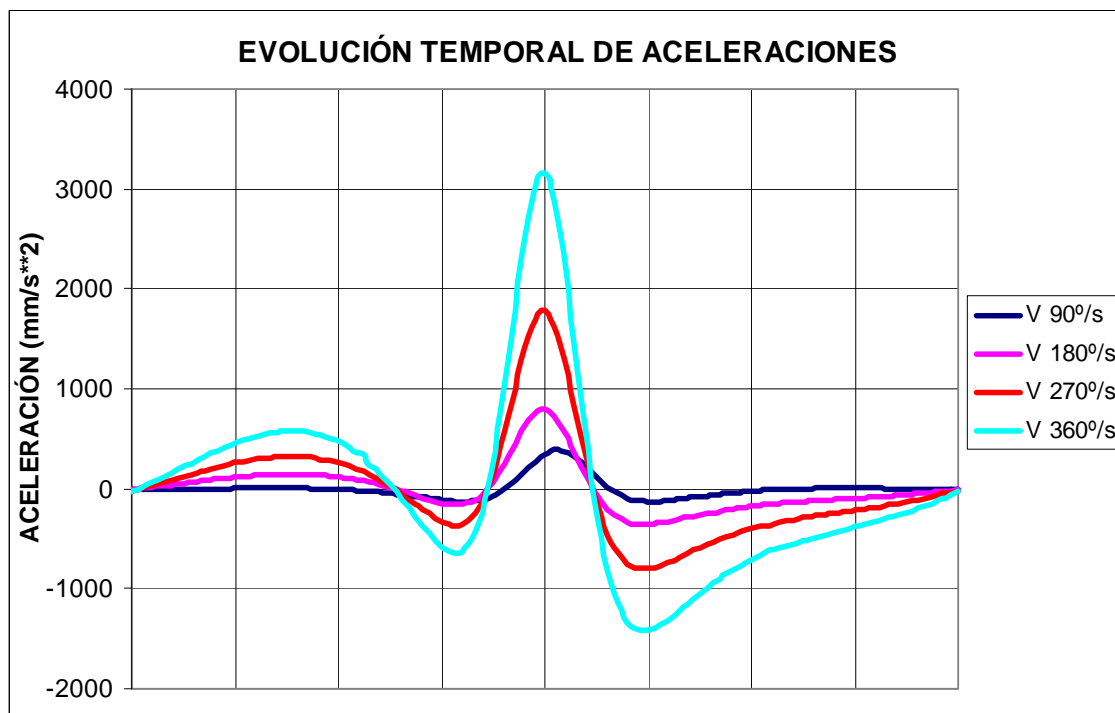
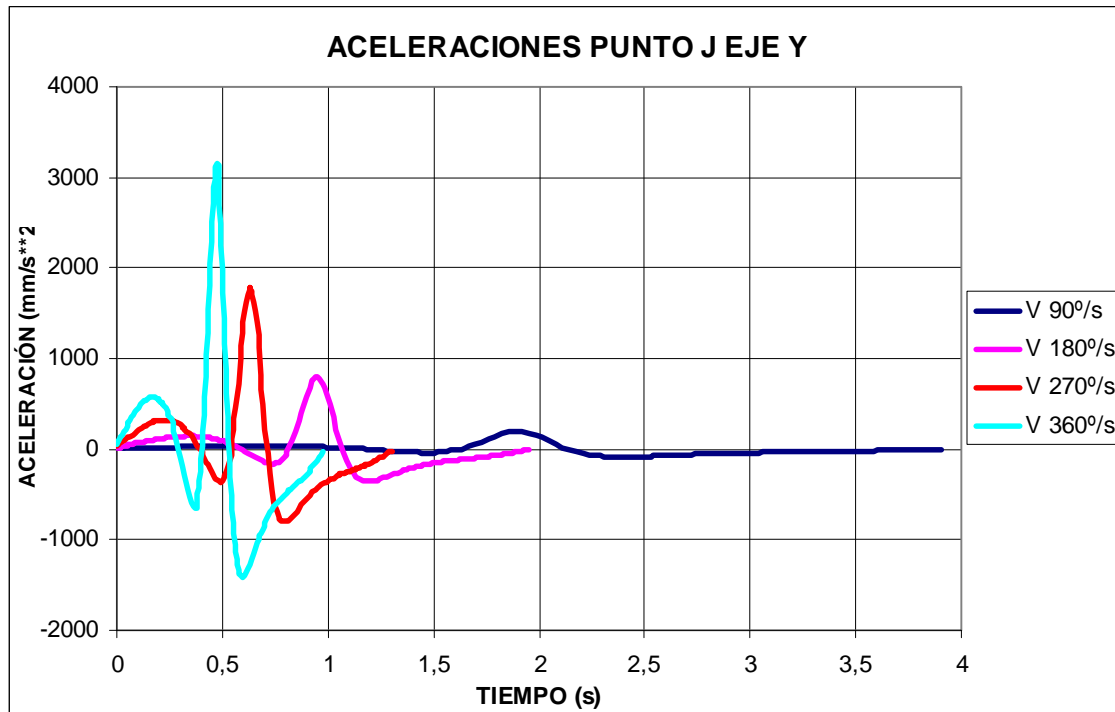
## Punto I eje Y



### Punto J eje X

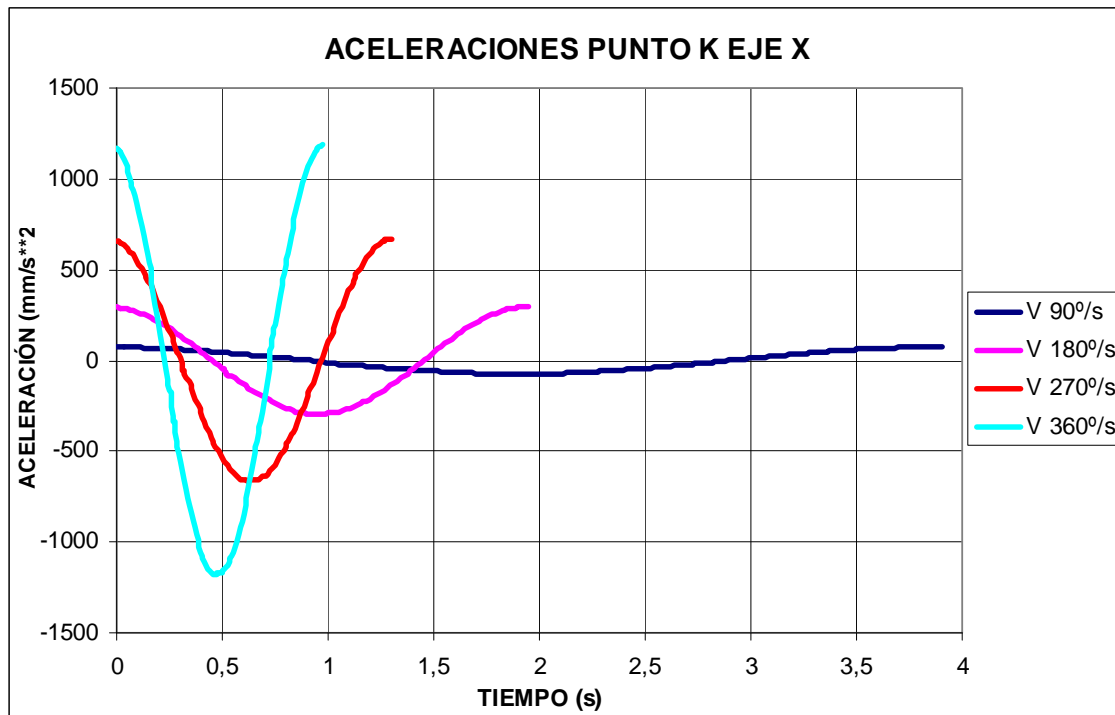


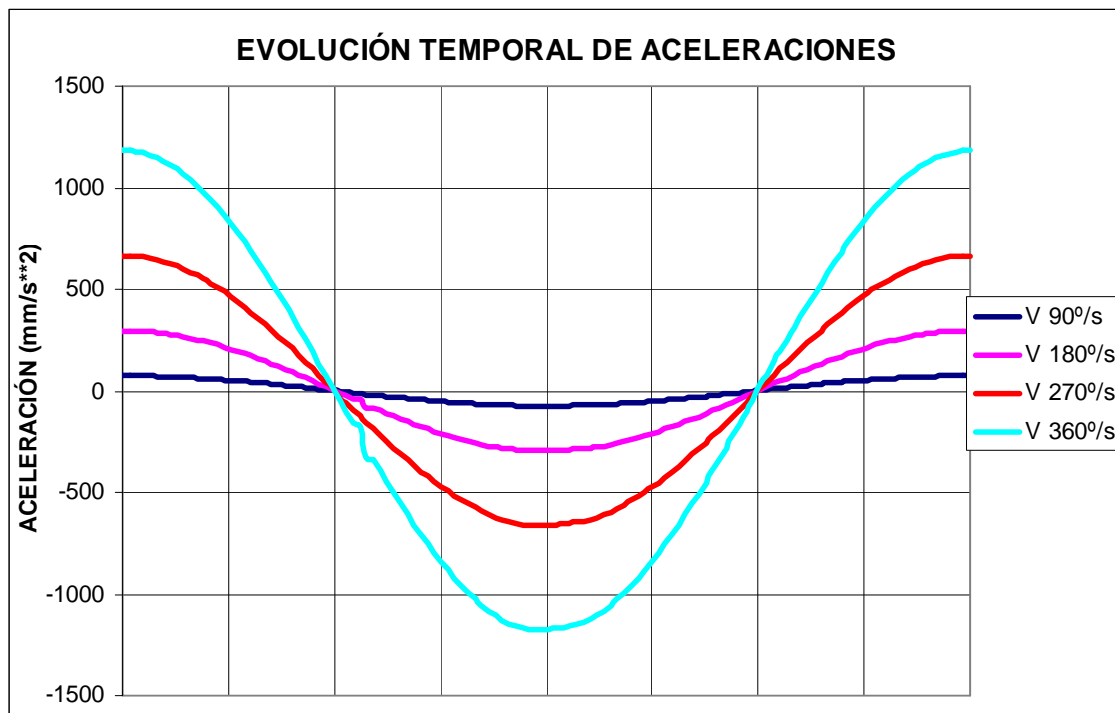
### Punto J eje Y





### Punto K eje X





### Punto K eje Y

